



Universidad
Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Mecánica

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

REDISEÑO DEL ROBOT BÍPEDO MIMBOT PARA INCORPORAR HABILIDADES MIMÉTICAS

Autor : Daniel Zango Casado

Tutor: Higinio Rubio Alonso

Leganés, noviembre de 2011





Título: **Rediseño del robot bípedo MIMBOT para incorporar habilidades miméticas.**

Autor: **Daniel Zango Casado.**

Director: **Higinio Rubio Alonso.**

EL TRIBUNAL

Presidente: Jesús Meneses Alonso

Vocal: Álvaro Olmedo Marcos

Secretario: Eduardo Corral Abad

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 18 de noviembre de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de _____

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS.

Ahora que esto se acaba, es inevitable acordarse de todas las personas que me han acompañado en este viaje académico, muchas de las cuales, por fortuna, también han estado a mi lado desde mucho antes y lo seguirán estando de ahora en adelante. Dicen que “es de bien nacidos ser agradecidos”, y yo tengo muchas, muchas cosas que agradecer.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia, sobre todo mis padres y mi hermano, por sus ánimos, su paciencia, su educación y, sobre todo, su cariño. Sé que soy afortunado por teneros y que todo lo que llegue a ser en la vida será gracias a vosotros.

Gracias de corazón a Beatriz por estar ahí siempre y para todo, porque sin ella mi vida no sería de tantos colores como lo es. Ella sabe bien que esta carrera no es un camino de rosas, y por eso ha sido mi principal apoyo durante estos años. Espero poder seguir correspondiéndote durante muchísimo tiempo a todo lo que me aportas día a día.

A mi gran amigo Carlos, siempre animando, siempre interesándose, y porque es como un segundo hermano para mí.

A mis amigos “de la uni”, Rufo, Mario, Álvaro, Dani, Tobe, Samu, Manolo, Monas y Javi, por los ratos en clase, las salidas por Madrid y los viajes, que se cuentan entre los mejores recuerdos que guardo de estos últimos años. Ellos son sin duda lo más valioso que me llevo de mi periplo en la Universidad y son para toda la vida. Por supuesto, tampoco me olvido del resto de mis amigos, ellos saben bien quiénes son y el papel importante que tienen en mi vida.

Al resto de compañeros de clase con los que he tenido algún tipo de relación, porque de alguna manera también han puesto su pequeño granito de arena, y a los profesores que me han impartido clase, especialmente aquéllos que mejor han conseguido transmitirme sus conocimientos y ganas de aprender.

Gracias a Higinio, mi tutor, no sólo por su inestimable ayuda, sino también por la confianza, los consejos y las historias.

Sólo me resta decir que estudiar una carrera como ésta suele proporcionar momentos de alegría y otros ratos menos apetecibles, pero, indudablemente, los que recordaremos siempre serán los mejores.

Resumen.

Este Proyecto propone el rediseño del robot bípedo PASIBOT para evolucionarlo al nuevo robot bípedo MIMBOT, partiendo del modelo con un grado de libertad e incorporándole dos nuevos grados de libertad actuados en cada pierna que permitan nuevos comportamientos miméticos, como el alargamiento, el acortamiento y la elevación del paso.

Además, se exportará el modelo rediseñado al programa MSC. Adams para comprobar su viabilidad mediante la simulación de algunas de las nuevas habilidades miméticas, tanto en el modelo colgado como en el modelo libre.

Abstract.

This Project proposes the redesign of the biped robot PASIBOT to evolve it into the new biped robot MIMBOT, starting from the one-degree of freedom model and adding two new actuated degrees of freedom to each leg, in order to allow the robot develop new mimetic behaviors, such as extending, shortening or raising its step.

Furthermore, the redesigned model will be exported to MSC. Adams so that its feasibility can be checked through the simulation of some of the new mimetic skills, in the hanging model as well as in the free model over ground.



ÍNDICE GENERAL

Capítulo I:

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	1
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
1.3. FASES DEL PROYECTO.....	6
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.	8

Capítulo II:

INTRODUCCIÓN	9
2.1. EL ROBOT PASIBOT.....	10
2.2. MODELOS ANTECEDENTES.....	17
2.2.1. PASIBOT con nuevo sistema de estabilización.....	17
2.2.2. PASIBOT con actuadores horizontales.	20
2.3. EL ROBOT MIMBOT.	21

Capítulo III:

DISEÑO DEL MIMBOT	23
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SOLID EDGE ST (WITH SYNCHRONOUS TECHNOLOGY).....	24
3.2. INTRODUCCIÓN A LA FASE DE DISEÑO.	27
3.3. IDEAS PREVIAS.....	28
3.4. PRIMER MODELO	29
3.5. SEGUNDO MODELO.....	32
3.6. MODELO DEFINITIVO.	34
3.6.1. Modelo con estabilizador descolgado.....	46

Capítulo IV:

IMPLEMENTACIÓN EN MSC. ADAMS	48
4.1. INTRODUCCIÓN.....	49
4.2. DESCRIPCIÓN DEL MSC. ADAMS.	49
4.2.1. Importación desde Solid Edge ST.	51
4.2.2. Posicionamiento del modelo.	54
4.2.3. Asignación de nombres, propiedades y color.	56
4.2.4. Implementación de juntas.	59
4.2.5. Implementación de motores.....	61
4.3. DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES.	64
4.4. MODELO COLGADO.....	65
4.4.1. Actuadores parados.	67
4.4.2. Actuadores con movimiento horizontal.....	70
4.4.3. Actuadores con movimiento vertical.	76
4.4.4. Combinación de movimientos horizontal y vertical.....	81
4.5. MODELO LIBRE.	84
4.5.1. Pruebas de estabilidad.	88
4.5.2. Actuadores parados.	91
4.6. EJERCICIOS: APLICACIÓN DE LAS HABILIDADES DEL ROBOT MIMBOT A DOS CASOS DE SUBIR ESCALONES.	100
4.6.1. Modelo sin inestabilidades.	100
4.6.2. Modelo con estabilizador horizontal.	109

Capítulo V:

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	117
5.1. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	118
5.2. TRABAJOS FUTUROS.....	120



Capítulo VI:

PRESUPUESTO	121
--------------------------	------------

6.1. PRESUPUESTO.	122
------------------------	-----

Capítulo VII:

BIBLIOGRAFÍA.....	125
--------------------------	------------

7.1. BIBLIOGRAFÍA.....	126
------------------------	-----

7.2. REFERENCIAS WEB.	127
----------------------------	-----

ANEXOS.....	128
--------------------	------------

ANEXO A: PLANOS DE LAS PIEZAS.....	129
------------------------------------	-----

ANEXO B: MANUAL BÁSICO DE APRENDIZAJE DEL SOFTWARE MSC. ADAMS.....	131
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Robot bípedo PASIBOT.....	10
Figura 2: Mecanismo de Chebyshev.....	11
Figura 3: Mecanismo de Pantógrafo.....	12
Figura 4: Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo.....	12
Figura 5: Chebyshev, Pantógrafo y Estabilizador.....	14
Figura 6: Secuencia del paso del PASIBOT.....	14
Figura 7: PASIBOT original.....	15
Figura 8: Nomenclatura de los componentes del PASIBOT.....	16
Figura 9: Pivotamientos del pie previos a la modificación.....	17
Figura 10: Cadera con contrapeso.....	19
Figura 11: Deslizadera y estabilizador nuevos.....	19
Figura 12: Diseño de la cadera para actuadores horizontales.....	20
Figura 13: Espacio de trabajo.....	21
Figura 14: Extremos del pie vs Posición del actuador.....	22
Figura 15: Aspecto del interfaz de Solid Edge ST.....	25
Figura 16: Primera propuesta de diseño.....	29
Figura 17: Comparación entre diseño anterior y primera propuesta.....	30
Figura 18: Deslizadera con guía para el actuador.....	31
Figura 19: Actuador horizontal.....	31
Figura 20: Variante de la primera propuesta vista desde el exterior y el interior de la cadera.....	32
Figura 21: Segunda propuesta de diseño.....	32
Figura 22: Comparación entre diseño anterior y segunda propuesta.....	33
Figura 23: Propuesta de diseño definitivo.....	34
Figura 24: Comparación entre diseño anterior y propuesta definitiva.....	35
Figura 25: Vistas de la deslizadera en forma de T invertida.....	36
Figura 26: Vista en perspectiva de la nueva deslizadera.....	36
Figura 27: Vistas del actuador.....	37

Figura 28: Vista en perspectiva del actuador.....	37
Figura 29: Deslizadera con el actuador.	38
Figura 30: Vistas de la cadera desde el exterior y el interior.	38
Figura 31: Vista detallada de la posición inicial del actuador.	39
Figura 32: Cadera completa con deslizaderas y actuadores.	39
Figura 33: Montaje del lateral derecho.....	40
Figura 34: Detalle de la zona de la colisión.	41
Figura 35: Vista frontal de la zona conflictiva.	41
Figura 36: Nueva configuración de los niveles de las piezas de la pierna.....	42
Figura 37: Vista frontal tras la nueva configuración.	42
Figura 38: Modificación sobre el fémur.	43
Figura 39: Modificación sobre el contrafémur.....	43
Figura 40: Modificación sobre el tendón inferior.	44
Figura 41: Vista lateral del MIMBOT definitivo.	44
Figura 42: Vista en perspectiva del PASIBOT definitivo.	45
Figura 43: MIMBOT con el paso cambiado.	45
Figura 44: Estabilizador descolgado vs Estabilizador paralelo al suelo.....	46
Figura 45: Evolución del estabilizador para descolgarlo.	47
Figura 46: Alternativa para descolgar el estabilizador.	47
Figura 47: MSC. Adams 2005.	49
Figura 48: Aspecto del módulo Adams/View.....	50
Figura 49: Ventana de inicio de Adams View.....	51
Figura 50: Ventana de importación de modelo.	52
Figura 51: Pantalla de selección de archivo a importar.	52
Figura 52: Ventana de nombre del modelo.	53
Figura 53: Modelo recién importado.	53
Figura 54: Modelo renderizado.....	54
Figura 55: Modelo girado.	55



Figura 56: Modelo posicionado.....	55
Figura 57: Database Navigator.....	56
Figura 58: Modificación de la pieza.....	57
Figura 59: Cambio de nombre de la pieza.....	57
Figura 60: Elección del material.	58
Figura 61: MIMBOT con c.d.m.....	58
Figura 62: MIMBOT con color.	59
Figura 63: Menú de Juntas.	59
Figura 64: Junta de rotación entre biela y manivela.....	60
Figura 65: Junta de traslación entre deslizadera y actuador.	60
Figura 66: Junta de fijación entre las manivelas.	61
Figura 67: Motor rotativo en la manivela derecha.	62
Figura 68: Motores lineales en deslizadera y actuador.	62
Figura 69: Modelo con juntas y motores.	63
Figura 70: Menú de contacto.	65
Figura 71: Contacto entre los pies.	66
Figura 72: Junta de fijación de la cadera.....	66
Figura 73: MIMBOT con actuadores parados.....	67
Figura 74: Estabilizador funcionando.....	68
Figura 75: Trayectoria del pie a lo largo de un ciclo.....	70
Figura 76: Función para el movimiento del actuador.	70
Figura 77: Alargamiento de la zancada delantera.....	71
Figura 78: Alargamiento de la zancada posterior.....	72
Figura 79: Acortamiento de la zancada trasera.	71
Figura 80: Acortamiento de la zancada delantera.....	71
Figura 81: Actuadores funcionando simultáneamente.....	72
Figura 82: Comparación entre paso normal y alargamiento de paso.....	74
Figura 83: Comparación entre paso normal y acortamiento de paso.	75

Figura 84: Actuador vertical subiendo el paso.....	76
Figura 85: Actuador vertical bajando el paso.....	76
Figura 86: Actuadores subiendo y bajando el paso.	77
Figura 87: Comparación entre paso normal y elevación de paso.	79
Figura 88: Comparación entre paso normal y descenso de paso.	80
Figura 89: Acortamiento y elevación de la zancada.....	81
Figura 90: Comparación entre paso normal y acortamiento más elevación del paso.....	82
Figura 91: Alargamiento y descenso de la zancada.	82
Figura 92: Comparación entre paso normal y alargamiento más descenso del paso.	83
Figura 93: Modelo libre.....	84
Figura 94: Creación del perfil rectangular.....	85
Figura 95: Redimensionamiento y posicionamiento del suelo.	86
Figura 96: Contactos entre pies y suelo.	86
Figura 97: Aceleración de la gravedad.	87
Figura 98: Modelo con suelo.....	87
Figura 99: Prueba a 0 mm.	88
Figura 100: Ventana de medida de magnitudes.	89
Figura 101: Prueba a 5 mm.	90
Figura 102: Prueba a 80 mm.	91
Figura 103: Parámetros de la simulación.....	92
Figura 104: Evolución de la trayectoria del robot.....	93
Figura 105: Vista cenital de la trayectoria del robot.....	95
Figura 106: Modelo con el pie izquierdo adelantado.	96
Figura 107: Simulación con el pie izquierdo adelantado.	98
Figura 108: Vista cenital de la trayectoria con el pie izquierdo adelantado.....	99
Figura 109: Primer ejercicio de subida de escalones.	101
Figura 110: Junta de Parallel Axes.....	101
Figura 111: Acortamiento del paso del pie izquierdo.	104



Figura 112: Elevación del paso del pie derecho.....	105
Figura 113: Elevación del paso del pie izquierdo.	105
Figura 114: Elevación y alargamiento de la zancada.	106
Figura 115: Segundo ejercicio de subida de escalones.....	110
Figura 116: Estabilizador horizontal.....	110
Figura 117: Modelo con estabilizador horizontal.	111
Figura 118: Ascensión del pie izquierdo.....	113
Figura 119: Ascensión del pie derecho.	114

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Posición del pie respecto al eje Y.....	69
Gráfica 2: Velocidad del pie respecto al eje X.	69
Gráfica 3: Velocidad del pie respecto al eje Y.	69
Gráfica 4: Posición actuador en eje X durante alargamiento del paso.	73
Gráfica 5: Posición pie en eje X durante alargamiento del paso.	73
Gráfica 6: Posición actuador en eje X durante acortamiento del paso.....	74
Gráfica 7: Posición pie en eje X durante acortamiento del paso.	75
Gráfica 8: Posición actuador en eje Y durante elevación del paso.	78
Gráfica 9: Posición pie en eje Y durante elevación del paso.....	78
Gráfica 10: Posición pie en eje X durante elevación del paso.....	78
Gráfica 11: Posición actuador en eje Y durante descenso del paso.....	79
Gráfica 12: Posición pie en eje Y durante descenso del paso.	80
Gráfica 13: Posición pie en eje X durante descenso del paso.	80
Gráfica 14: Desplazamiento vs tiempo para 0 mm.	89
Gráfica 15: Desplazamiento vs tiempo para 5 mm.	90
Gráfica 16: Desplazamiento vs tiempo para 80 mm.	91
Gráfica 17: Posición de la cadera en eje Z.....	95
Gráfica 18: Posición de la cadera en eje Z paso cambiado.	99
Gráfica 19: Posición cadera eje Z.	107
Gráfica 20: Posición cadera eje Y.	107
Gráfica 21: Posición pie izquierdo eje X.	107
Gráfica 22: Posición pie izquierdo eje Y.	108
Gráfica 23: Posición pie izquierdo eje Z.	108
Gráfica 24: Posición pie derecho eje Y.	108
Gráfica 25: Posición cadera eje Y II.	115



Gráfica 26: Posición cadera eje Z II.	115
Gráfica 27: Posición pie izquierdo eje Y II.	115
Gráfica 28: Posición pie izquierdo eje X II.	116
Gráfica 29: Posición pie derecho eje X.	116
Gráfica 30: Posición pie derecho eje Y.	116



Capítulo I:

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.

Hace tiempo que los robots intervienen en algunas actividades humanas. En el ámbito de la industria, por ejemplo, el uso de robots se inició hace más de treinta años, con el objetivo de ahorrar algunas tareas a las personas y de aumentar la productividad. De hecho, la palabra “robot”, etimológicamente, significa “trabajador” o “sirviente”. En general, se trata de robots multi-articulados, en forma de brazo, que realizan tareas programadas, más o menos inteligentes, en los procesos de producción industrial, tales como la pintura, la soldadura o la carga de maquinaria. Por otro lado, los robots también están resultando muy útiles al servicio de la investigación, sobre todo en la exploración de rincones inaccesibles, como pueden ser el fondo oceánico o el espacio. Estos robots suelen adoptar formas móviles encima de plataformas rodantes o bien tipo artrópodo.

Últimamente, además, cabe añadir la nueva generación de robots diseñados para el uso doméstico: tareas de limpieza, de cocina o de seguridad e, incluso, de ocio. Tienen la apariencia de pequeños electrodomésticos, pero se diferencian de ellos por el hecho que son una poco “inteligentes”, es decir, son capaces de detectar cambios en el entorno y actuar en función de lo que perciben. Se espera que en el futuro sean habituales en la mayoría de los hogares.

Por otra parte, existe una rama de la robótica, la humanoide, que se encuentra en una fase de desarrollo más temprana, pero que ha experimentado grandes avances en los últimos años. Hoy todavía hay que hablar en términos de robótica experimental, pero se espera que, en un futuro no demasiado lejano, permita encontrar soluciones para la vida de muchas personas, sea para desarrollar tareas de ayuda a personas mayores o con dificultad de movilidad, o para amenizar algunas actividades de ocio.

Los robots bípedos (es decir, que caminan sobre dos piernas) sortean obstáculos y suben o bajan escaleras tienen que ser, por fuerza, máquinas inteligentes. Para realizar estas actividades de manera autónoma hace falta que los robots sean capaces de percibir el espacio, de detectar los objetos y de tomar decisiones. Mediante sensores de visión, de fuerza, de distancia, de inclinación y de unidades de proceso, los robots incorporan estas capacidades, las cuales les permitirán decidir, en un determinado momento, si seguir una determinada dirección o subir una escalera.

No obstante, antes de resolver esas cuestiones, se debe empezar por conseguir lo básico en un robot bípedo: el correcto funcionamiento y movimiento de sus dos piernas. Esto, que en principio podría parecer algo sencillo, conlleva una ardua tarea de análisis de los mecanismos del robot, de modo tal que su movimiento resulte estable, sin que se vea afectado por vuelcos, balanceos, cambios de dirección u otros comportamientos anómalos. Con este fin, serán necesarias diversas variaciones sobre el modelo inicial de un robot, como por ejemplo modificar el movimiento de las piernas de los robots, consiguiendo más grados de libertad, lo que les da mayor flexibilidad de movimientos y permite realizar comportamientos más sofisticados.

En este escenario se situó el grupo de investigación MAQLAB del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid cuando se propusieron el diseño de un robot bípedo de tamaño natural, el PASIBOT, que imitaría el comportamiento humano al caminar. El reto planteado al inicio del desarrollo de dicho proyecto de investigación consistió en conseguir el movimiento del robot con un solo grado de libertad, accionado por un único motor eléctrico, reduciendo con ello al mínimo el número de actuadores.

Gracias a esta particularidad, se reduciría el peso del robot, lo que conlleva un ahorro de energía y, finalmente, una reducción del coste económico. Por contra, aumentan las dificultades a la hora de conseguir una buena movilidad.

El proyecto del PASIBOT, por tanto, ofrece múltiples líneas de investigación, enfocadas a la mejora de su movilidad. Lo ideal es conseguir que el robot sea capaz de caminar sobre varias superficies: plano, con inclinación, escaleras, etc., además de ser capaz de ejecutar diferentes maneras de caminar. Al andar, debe tener movimiento de cadera en los planos frontal y sagital y ser capaz de girar y de seguir curvas. El contacto entre el pie y el terreno ha de ser estudiado y ajustado (condiciones del pie: la forma, la rigidez, amortiguación,...). También, deberá ser capaz de caminar con una velocidad constante. En definitiva, conseguir la mayor similitud posible entre la manera de caminar de los seres humanos y la del PASIBOT.

La motivación final para la realización de este Proyecto es, pues, la participación en el desarrollo de un proyecto real de ingeniería mecánica enmarcado en un campo que se perfila de gran importancia en un futuro próximo. El interés de formar parte en ello radica en el aprendizaje de técnicas aplicadas a la Robótica, el manejo de programas informáticos de extendido uso en el mundo ingenieril y el uso de la creatividad en conjunción con los conocimientos en Mecánica adquiridos a lo largo de la carrera, con el fin de resolver los problemas más inmediatos que afectan al buen funcionamiento del PASIBOT, optimizar dicho funcionamiento y dotarlo de nuevas habilidades.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El desarrollo del robot bípedo PASIBOT es un proyecto ambicioso en el campo de los robots de servicio: en contraposición con la gran mayoría robots humanoides actuales que presentan un gran número de grados de libertad, lo que repercute en elevado peso debido a los diferentes actuadores necesarios para producir el movimiento, con este robot se plantea una nueva concepción y un nuevo enfoque. Para ello se ha desarrollado un primer modelo de un solo grado de libertad, a través del cual se consigue una configuración muy ligera que reproduce el caminar humano de una forma muy fiable.

Los Proyectos que se vienen realizando durante los últimos años concernientes al PASIBOT buscan la consecución de unos objetivos que se podrían resumir en: analizar y optimizar el diseño del robot, con el fin de detectar y corregir sus disfunciones y conseguir un funcionamiento del mismo más estable y funcional, y encaminar a la vez dicho diseño a la implementación de nuevas habilidades que amplíen el rango de movimientos del robot.

Este Proyecto concretamente busca alcanzar *dos objetivos principales*, que se resumen en:

- Llevar a cabo en un programa de CAD el diseño de unos actuadores que permiten la adición de nuevas habilidades a la evolución del PASIBOT: el robot bípedo MIMBOT.
- La exportación, adecuación e implementación del nuevo modelo de bípedo en un *software* de simulación mecánica de mecanismos, el MSC.ADAMS, con el fin de comprobar su funcionamiento.

Para la consecución de los objetivos principales, se han de recorrer una serie de los pasos, que se describen detalladamente en el apartado 1.3. (Fases del Proyecto), y que se resumen a continuación, ya que suponen en sí objetivos secundarios que han de ser alcanzados:

- Propuesta de varias alternativas al diseño de los actuadores en el programa Solid Edge para contar con cierta libertad de elección.
- Análisis de las propuestas y selección de la más favorable a nuestros intereses.
- Estudio de la implantación de los actuadores en el MIMBOT, con el rediseño de algunas de las piezas que constituyen el robot, si ello fuera necesario.
- Se implementarán e integrarán anteriores modificaciones en el nuevo diseño, para que el número de operaciones a realizar sobre el modelo, para probar sus funcionalidades, sea el mínimo posible.
- Teniendo en cuenta las consideraciones de los anteriores puntos, obtención con el software Solid Edge de un modelo del MIMBOT listo para ser exportado al software de análisis MSC. Adams.

- Obtención de un diseño del modelo del MIMBOT que incluya el estabilizador primitivo, para poder determinar, en futuras pruebas, la influencia de los actuadores sobre la inclinación de los pies y la dinámica del paso.
- Implementación del modelo en MSC. Adams: materiales de los elementos; definición de contactos en juntas y apoyos; y motores y actuadores.
- Comprobación del funcionamiento de los actuadores en distintas situaciones, diferenciando claramente modelos colgado y libre.
- Aplicación de los nuevos actuadores a ejercicios en los que el bípedo MIMBOT debe subir escalones.

1.3. FASES DEL PROYECTO.

Todo proyecto de Ingeniería comprende una serie de fases a lo largo de su desarrollo. Los proyectos de innovación proporcionan una mayor libertad a la hora de llevarlos a cabo, ya que no establecen ninguna restricción previa para cumplir los objetivos del proyecto, y es al final cuando se analiza la bondad y viabilidad del diseño final. El Proyecto que nos ocupa se trata de un proyecto de innovación, así que se deja al criterio del investigador el diseño que mejor cumplirá finalmente con los objetivos perseguidos.

Las fases planificadas para el desarrollo de este proyecto son:

- **FASE 1. Estudios previos:** En esta fase se plantean los objetivos, motivaciones y necesidades que el diseño debe cumplir. Se realiza un diseño conceptual y, sobre él, se hacen los estudios de viabilidad de forma analítica.
- **FASE 2. Diseño y simulación:** En esta fase se realiza el modelado del mecanismo diseñado anteriormente. Una vez implementado se procederá a la simulación y obtención de datos. Una vez sean analizados dichos datos, se considerará si es necesario realizar modificaciones en el modelo preliminar.
- **FASE 3. Implementación final:** Si los resultados del modelo virtual modificado son satisfactorios y cumplen los objetivos establecidos se procederá a implementar el diseño y las modificaciones en el modelo real, el cual se someterá a las pruebas oportunas que determinen que, efectivamente, resultan válidos y funcionan correctamente.

Este Proyecto parte de la necesidad de implementar en el modelo varios mecanismos que lo habiliten para realizar ciertas tareas ya concretadas. Es al investigador a quien le corresponde decidir la manera de materializar esos mecanismos sobre el modelo y, una vez implantados y probados, comprobar si hiciera falta realizar alguna modificación sobre los diseños previos. De este modo, se puede considerar que este Proyecto parte de la Fase 2, ya que el primer paso será diseñar las mejoras pensadas sobre el modelo en un programa de CAD.

Las fases de las que consta este Proyecto se pueden resumir en las siguientes líneas:

En primer lugar, se hará uso de un programa de CAD, el Solid Edge ST, para modelar una serie de propuestas para el diseño de la cadera que cumplan en principio con los objetivos perseguidos. Posteriormente, se analizarán todas las propuestas y se seleccionará la que más se adecúe a las necesidades del diseño. La nueva cadera se implementará en el modelo anterior de PASIBOT y se comprobará si resulta necesario realizar otras modificaciones menores para que la implementación se produzca correctamente.

Posteriormente, se exportará el modelo del robot a un programa de simulación de mecanismos, el MSC. Adams, donde se llevarán a cabo las operaciones que preparen el

modelo para las simulaciones que se desean realizar. Las primeras simulaciones se efectuarán con el modelo del MIMBOT colgado, y serán de utilidad principalmente para verificar el correcto funcionamiento de las juntas y los actuadores. Se pondrá énfasis en las nuevas capacidades del robot para acortar o alargar la zancada gracias a los actuadores horizontales, y elevarla o bajarla por medio de los verticales.

En cuanto al modelo libre sobre suelo, las primeras simulaciones serán unas pruebas de estabilidad que permitan observar en qué momento el robot se encuentra completamente parado y puede comenzar a moverse sin que se produzcan inestabilidades de inicio.

El siguiente paso consistirá en simular el movimiento del robot libre, en el que entran en juego la aceleración de la gravedad y contactos con el suelo que pueden provocar inestabilidades a lo largo del caminar del modelo.

Finalmente, se desarrollarán dos ejercicios, cada uno con unas condiciones diferentes de restricción del modelo, en los que se deberán implementar los nuevos actuadores de forma tal que puedan ser combinados para, a lo largo de una simulación, ser capaz de subir escalones sufriendo la menor inestabilidad posible.

La redacción del documento también contempla la estimación de un presupuesto para la elaboración del Proyecto.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.

Este documento se encuentra dividido en ocho capítulos, incluyendo la bibliografía, a los que se añaden los Anexos:

- **Capítulo I – Motivación y objetivos del Proyecto.**

En este primer capítulo, se exponen las motivaciones y los objetivos del Proyecto, las fases de las que consta y la manera en la que se ha estructurado el documento.

- **Capítulo II – Introducción.**

Se explica brevemente el desarrollo de la Robótica a lo largo de la Historia y se explican los antecedentes que existen del PASIBOT. Se realiza una descripción del robot y las evoluciones que ha sufrido desde su primer diseño.

- **Capítulo III – Diseño del MIMBOT.**

En este capítulo, se plantean diversas opciones para el diseño de los nuevos actuadores y cadera en Solid Edge ST, detallando cada una de ellas y destacando la que se elige como definitiva para su posterior implementación en MSC. Adams. Además, se reflejan otras modificaciones realizadas sobre el modelo y variantes del modelo definitivo.

- **Capítulo IV – Implementación en MSC. Adams.**

Se describe el proceso mediante el cual el modelo queda preparado para ser simulado en este programa y se explican las simulaciones que se llevaron a cabo en distintas situaciones: primero, con el modelo colgado; posteriormente, con el modelo libre, incluyendo pruebas de estabilidad. Finalmente, se detallan los ejercicios que se llevaron a cabo para demostrar las nuevas habilidades del MIMBOT.

- **Capítulo V – Conclusiones y trabajos futuros.**

En este capítulo se obtienen las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del Proyecto y se proponen trabajos futuros relacionados con la optimización del prototipo y la evolución del robot.

- **Capítulo VI – Presupuesto.**

Se ofrece una estimación del presupuesto destinado a la elaboración del Proyecto.

- **Capítulo VII – Bibliografía.**

Se recogen las referencias bibliográficas que han sido manejadas.

- **Anexos.**

Contienen los planos de las piezas rediseñadas y el manual básico de usuario de MSC. Adams.



Capítulo II:

INTRODUCCIÓN

2.1. EL ROBOT PASIBOT.

El diseño original del PASIBOT, que se presenta en la figura 1, fue desarrollado por el grupo MAQLAB del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, en el año 2007. Se trata de un diseño sencillo y optimizado de un robot bípedo, debido a que solo cuenta con un grado de libertad.



Figura 1: Robot bípedo PASIBOT.

El material empleado en la fabricación de los eslabones que forman parte del robot original es Aluminio 2024-T351. Se eligió esta aleación por tratarse de un material extremadamente fuerte, con buena maquinabilidad para uso mecánico y que, además, ha sido empleado en otros estudios universitarios con resultados satisfactorios.

El diseño del robot está basado en dos mecanismos: el *Chebyshev* y el *Pantógrafo*. Además, se le ha añadido un mecanismo *estabilizador* para mantener el robot siempre estable y paralelo al suelo. A continuación, se realizan unas descripciones de estos mecanismos, de su funcionamiento y su composición.

Mecanismo de Chebyshev.

Con el mecanismo de Chebyshev, se convierte el movimiento circular del motor en la entrada del mecanismo, en un movimiento de tramo recto y curvo en la salida del mismo.

Se trata de un mecanismo simple, formado por tres eslabones: manivela motor, biela y balancín. La manivela transmite el movimiento puro de rotación a un movimiento compuesto en la biela. A continuación, en la figura 2, se muestra la representación de este mecanismo.

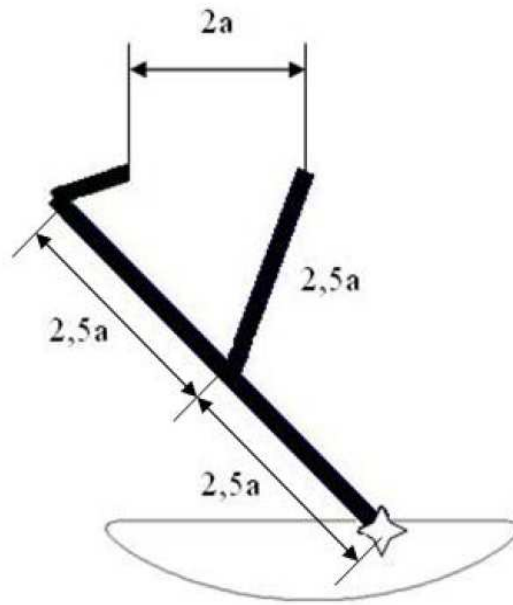


Figura 2: Mecanismo de Chebyshev.

Este mecanismo es el mecanismo principal para el correcto funcionamiento del robot. Con la relación de dimensiones que se muestra en la figura anterior, se consigue transformar el movimiento circular puro que le transmite el motor a la manivela, en un movimiento de salida de la biela compuesto por un tramo casi recto y un tramo curvo. El movimiento recto se logra cuando el pie está apoyado totalmente en el suelo, y el otro pie está realizando la trayectoria elíptica que lo desplaza hacia delante para apoyar posteriormente su superficie en el suelo e invertir las funciones.

Mecanismo de Pantógrafo.

El pantógrafo es un mecanismo de origen griego basado en las propiedades de los paralelogramos. Está formado por varios eslabones (fémur, tibia y tendones) conectados entre sí de tal manera que se pueden mover respecto de un punto fijo (pivote).

El pantógrafo (fig. 3) permite copiar una figura o reproducirla a escala distinta. Para ello se varía la distancia entre los puntos de articulación de cada uno de los eslabones, conservando siempre la condición de paralelismo entre ellos, dos a dos.

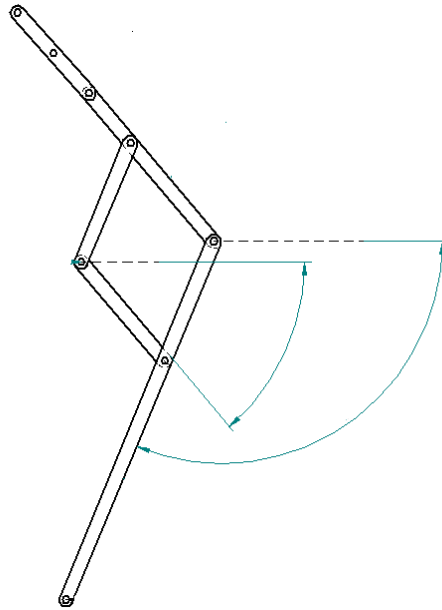


Figura 3: Mecanismo de Pantógrafo.

En concreto, en su aplicación al robot PASIBOT se logra aumentar e invertir el movimiento que generaba el mecanismo de Chebyshev (fig. 4).

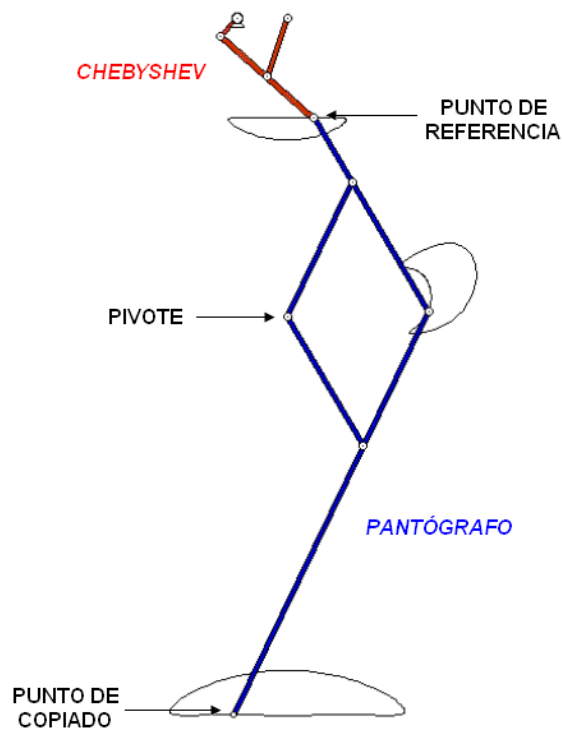


Figura 4: Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo.

Mecanismo de Estabilización.

Una vez que se ha conseguido el movimiento deseado para realizar el paso, se necesita que el robot se mantenga estable mientras realiza este paso. Para ello hay que añadir un pie al mecanismo para que soporte el peso del robot y no vuelque. La adición de este pie, lleva consigo la adición de un nuevo mecanismo que haga que el pie permanezca en todo momento paralelo al suelo. Este mecanismo está formado por los siguientes eslabones: estabilizador, contrafémur, rodilla y peroné.

La solución original que se adoptó fue poner una corredera fija a la cadera en donde se encuentran los extremos fijos de la manivela y la biela pertenecientes al mecanismo de Chebyshev. En estudios posteriores, se demostró que este mecanismo no era del todo preciso, ya que el pie no permanecía en todo momento paralelo al suelo, y por ello se dedicó un Proyecto a su modificación [1] [8].

La corredera está unida a un eslabón “estabilizador”, unido a su vez con el punto de referencia del pantógrafo y también unido a un sistema paralelo al pantógrafo, el *mecanismo de estabilización*, que obliga a que el ángulo descrito por ambos eslabones sea el mismo. Esta corredera solo permite movimiento en la dirección paralela al suelo, con lo cual los eslabones transmiten a su vez este movimiento al resto del mecanismo. Ambos mecanismo terminan en el mismo eslabón, que es el pie, con lo cual este siempre permanecerá paralelo a la superficie, (posteriormente, como se observa en la imagen, se demostró que no es del todo cierto).

En la figura 5 se puede observar, en azul, el mecanismo estabilizador unido mediante el eslabón “estabilizador” al pantógrafo, tal y como se describió anteriormente. En concreto, en esta imagen se observa cómo la pierna izquierda (en color blanco) está apoyada totalmente en el suelo (tramo recto del período de recorrido de la manivela) y la pierna derecha está realizando el paso para avanzar (tramo curvo del período de recorrido).

El mecanismo de Chebyshev se representa en color verde y el Pantógrafo, por su parte, en color rojo.

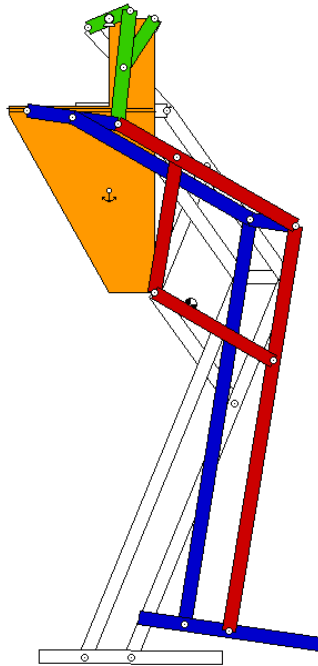


Figura 5: Chebyshev, Pantógrafo y Estabilizador.

En las siguientes imágenes de la figura 6 se representa la secuencia del paso:

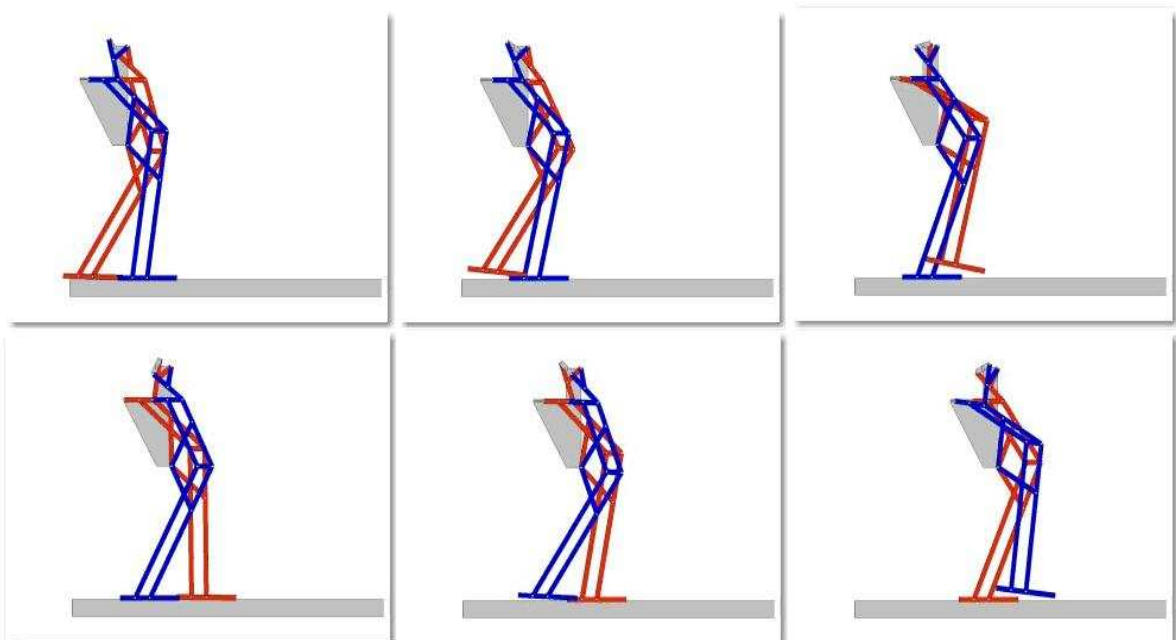


Figura 6: Secuencia del paso del PASIBOT.

De esta forma se obtiene el mecanismo completo de transmisión de movimientos del robot. Como el robot debe de ser simétrico, una vez que se conoce el diseño de una pierna, se puede

obtener directamente el diseño completo del robot. Por tanto, el diseño del PASIBOT original queda de la siguiente forma:

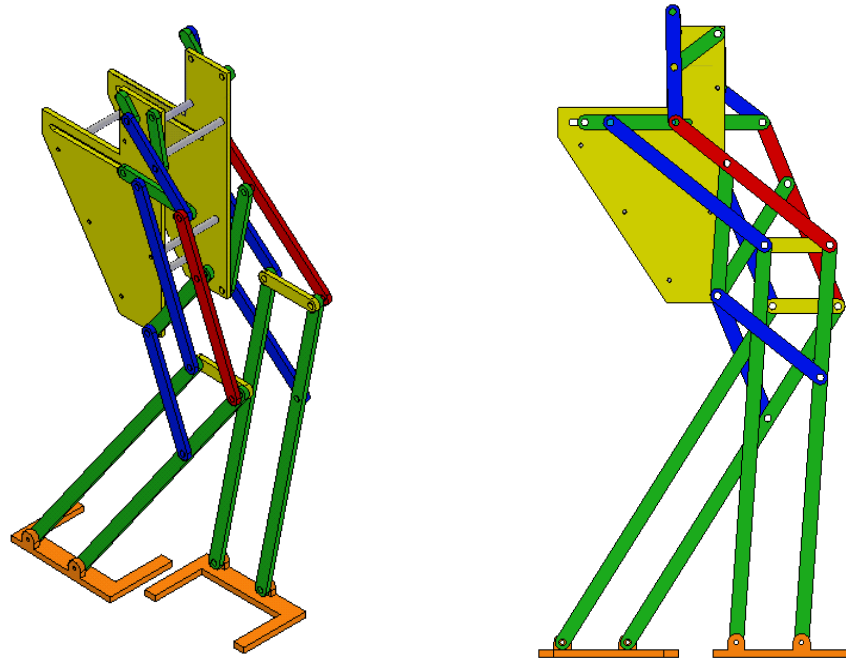


Figura 7: PASIBOT original.

El prototipo inicial que se observa en la imagen, (el cual no tiene en cuenta el peso del sistema de transmisión alojado en las caderas), tiene un peso total de 5,077Kg, para el material anteriormente descrito (AI 2024-T351).

Es importante conocer la asignación de nombres a los eslabones que se llevó a cabo tras la construcción del prototipo, ya que es necesario poder identificarlos con rapidez y diferenciarlos los unos de los otros.

Estos nombres son los que aparecen en la figura 8.

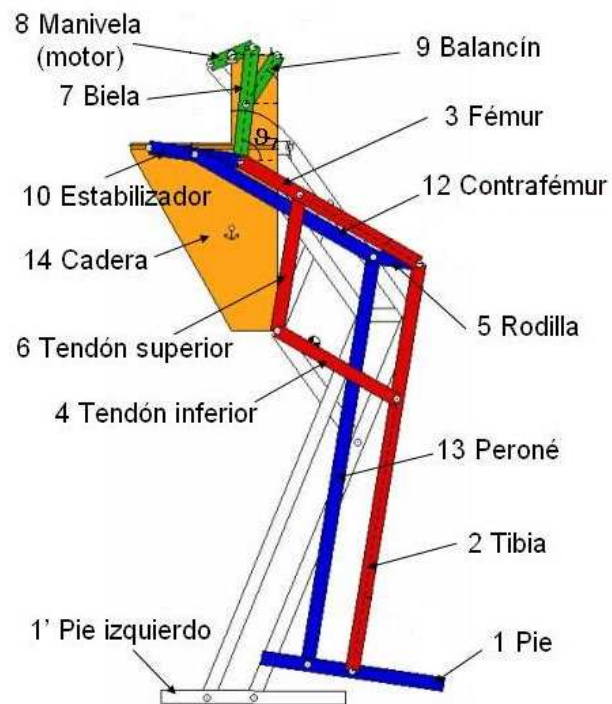


Figura 8: Nomenclatura de los componentes del PASIBOT.

2.2. MODELOS ANTECEDENTES.

El Proyecto que nos ocupa viene precedido por otros Proyectos anteriores concernientes a diversos aspectos del PASIBOT. En ellos, se plantearon mejoras para optimizar su funcionamiento, se diseñaron modificaciones para ampliar su rango de movimientos y se analizó su comportamiento bajo diversas condiciones.

Todos esos Proyectos han sido consultados durante la realización de éste, pero dado que este Proyecto se centra en el diseño de un sistema de actuadores que reuniera las anteriores modificaciones realizadas sobre el modelo, se tomaron como referencia principalmente dos de ellos: “Análisis y simulación del robot bípedo PASIBOT” [2], en el que se trabaja con un modelo de PASIBOT que incorpora actuadores horizontales en la cadera, y “Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo PASIBOT” [1], que facilita el modelo del robot en Solid Edge sobre el cual se ha trabajado en el presente Proyecto.

Ambos modelos se explican en los apartados siguientes, mas existen otros Proyectos [3] [5] que pueden ser consultados al respecto, en los que se trata de una forma más analítica la inclusión de actuadores teóricos en el modelo del PASIBOT.

2.2.1. PASIBOT con nuevo sistema de estabilización.

Este modelo es el desarrollado en el Proyecto [1]. En él, se realizó un estudio del modelo de PASIBOT original en Adams. Después de varios ensayos se observó que el robot no conseguía caminar recto y que avanzados unos pasos, acababa perdiendo la estabilidad y caía al suelo. Se dedujeron algunas de las causas por las cuales se podía producir este fenómeno.

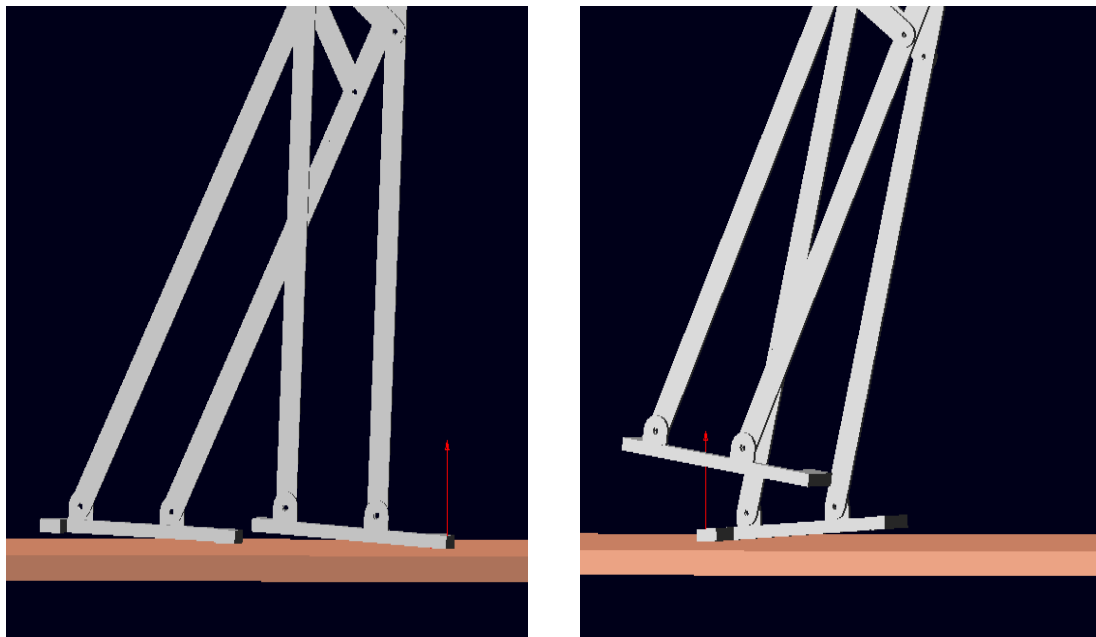


Figura 9: Pivotamientos del pie previos a la modificación.

La primera de las razones de que acabase perdiendo el equilibrio era la mala posición del centro de gravedad. En primer lugar, a la hora de levantar el pie trasero para efectuar el paso, debido a una mala posición del centro de gravedad del robot, éste acababa inclinándose hacia arriba quedando solo en contacto con el talón de su pie de apoyo, lo que producía el desequilibrio del mismo y su posterior desviación respecto de la trayectoria a seguir. Este hecho provoca que el robot tienda a desplazarse hacia atrás debido al momento de vuelco que genera la mala posición del centro de gravedad unido a la pérdida de equilibrio del bípedo al no tener los dos pies apoyados en el suelo. Esto se observa en la figura 9.

De la misma manera, en la segunda etapa del paso, cuando el bípedo se encontraba apoyado en un solo pie y el opuesto se encontraba en posición adelantada, acababa perdiendo la estabilidad antes de apoyar el pie delantero, haciendo que el pie de apoyo se levantase ligeramente por la zona del talón. Esto suponía que en el momento del contacto con el suelo, el pie adelantado entrase inclinado en lugar de apoyar completamente su superficie.

El segundo de los factores fue el hecho de que la trayectoria de la planta del pie tampoco ayudaba a mantener la estabilidad del robot, ya que a la hora de entrar en contacto con el suelo, lo primero que apoyaba era el pico delantero en lugar de toda la superficie. Esto es debido a que el estabilizador del robot no seguía una trayectoria paralela al suelo, sino que se inclinaba un poco hacia delante en su movimiento de giro transmitido por el mecanismo de *Chebyshev*, inclinando a su vez el pie hacia delante.

Este fenómeno provocaba que las dos superficies de los pies no estuvieran en contacto completo con el suelo durante el apoyo, produciendo una menor superficie de contacto, lo que se traducía como un menor agarre para combatir las fuerzas de inercia y menor estabilidad para contrarrestar el peso del robot, favoreciendo el hecho de que el bípedo pivotase sobre si mismo impidiendo que se mantuviera estable y que siguiera una trayectoria recta.

Estos resultados condujeron a llevar a cabo modificaciones que mejoraran el comportamiento del robot bípedo. Se efectuaron modificaciones en el **estabilizador** para conseguir que los pies entraran completamente horizontales y paralelos al suelo, y también se propuso una mejora en el diseño de las *Caderas* y todo el *Sistema de Transmisión* para conseguir una posición del **centro de gravedad** que permitiera caminar de manera estable al robot.

Para corregir el problema relacionado con el centro de gravedad, se realizó una modificación en la cadera colocando un contrapeso (fig. 10) que permitió recolocar el centro de gravedad del bípedo, hasta lograr la posición correcta del mismo. Esto repercutió de forma beneficiosa en el caminar del bípedo, ya que favoreció que el momento de vuelco que se creaba anteriormente que hacía volcar hacia atrás al robot se viera reducido y no se desequilibrara.

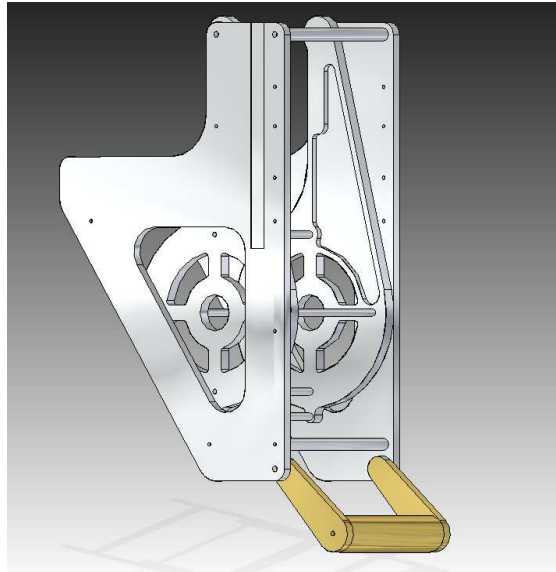


Figura 10: Cadera con contrapeso.

En cuanto al nuevo estabilizador, que es la modificación que más peso tiene en relación con el Proyecto que nos ocupa, se trató de abarcar el movimiento vertical del estabilizador colocando una guía vertical en el único lado posible de la cadera, que es borde delantero. Por ella se introdujo una deslizadera que a su vez hace de guía horizontal al nuevo estabilizador, esta de forma que rebasara el borde de la cadera para poder abarcar la totalidad del movimiento horizontal del estabilizador, como se refleja en la figura 11.

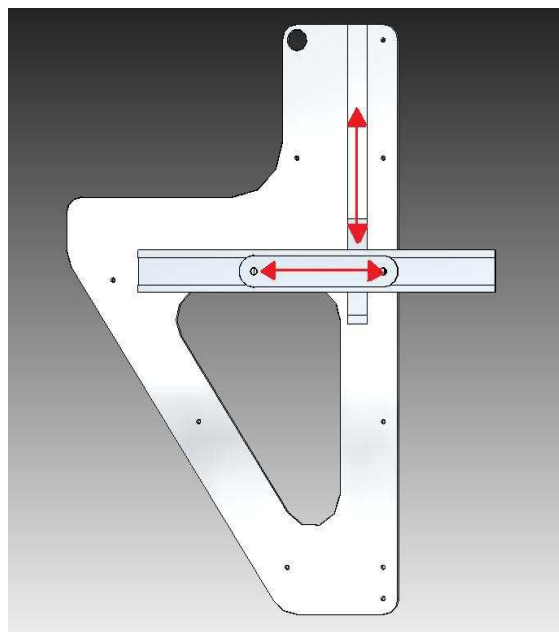


Figura 11: Deslizadera y estabilizador nuevos.

Estas modificaciones se encuentran ampliamente detalladas en el Proyecto correspondiente [1], aquí se ha querido presentar el resultado final de llevar a cabo cada una de ellas.

2.2.2. PASIBOT con actuadores horizontales.

Este modelo fue desarrollado en los Proyectos [2] [5]. En ellos, se proponía la inclusión de actuadores horizontales en la cadera, que permitieran ampliar el abanico de movimientos que el robot PASIBOT pudiera realizar, como el alargamiento y el acortamiento de la zancada (fig. 12).



Figura 12: Diseño de la cadera para actuadores horizontales.

Las posibilidades que ofrecía el nuevo actuador eran múltiples. Las que fueron objetivo de dicho proyecto son las habilidades que permiten el control de la estabilidad del PASIBOT mediante la variación de la posición del CDM en el sentido longitudinal de la marcha, pero además de eso se podría llegar a implementar una secuenciación de movimientos entre actuadores tal que se podrían implementar trayectorias curvilíneas con dicho mecanismo, ya que teniendo en cuenta los rozamientos de los pies y el pivotamiento sobre los mismos, se observó que es posible mediante el acortamiento de uno de los recorridos del paso y el alargamiento del otro hacer variaciones controladas en la dirección del PASIBOT.

Mediante cálculos, se llegó a la conclusión de que la máxima zancada que se podría llegar a realizar sería de 522 mm y la mínima de 42,5 mm. Todas las demás posiciones serían realizables dentro de las posibilidades que ofrecen los rozamientos y en definitiva la estabilidad del PASIBOT.

2.3. EL ROBOT MIMBOT.

El robot PASIBOT fue diseñado con menos actuadores que juntas biológicas tiene la pierna humana, disponiendo de un único grado de libertad. Esta condición de diseño restringe considerablemente la movilidad del robot, por lo que se decidió efectuar un rediseño del mismo, añadiendo dos grados de libertad al mecanismo base. La modificación del diseño del PASIBOT consistió en colocar un par de actuadores lineales en cada uno de los puntos donde el mecanismo inferior de la pierna se fijaba a la cadera.

El robot *MIMBOT* constituye la evolución del robot PASIBOT tras las modificaciones realizadas encaminadas a habilitarlo para que imite lo más fielmente posible los movimientos del caminar humano. La nueva denominación procede del término “mimetismo”, es decir, adoptar comportamientos ajenos intentando imitarlos.

La adición de los pares de actuadores lineales antes mencionados permitiría al robot ser capaz de realizar acciones tales como subir un escalón, alargar o acortar el paso, inclinar el pie, superar un pequeño obstáculo, etc.

Así pues, en este modelo del robot MIMBOT se pretenden integrar los actuadores necesarios para permitir que el punto de la cadera donde se articulan los tendones superior e inferior pueda desplazarse linealmente en sentido horizontal y vertical. Asimismo, se mantendrá la reforma efectuada sobre el estabilizador en el Proyecto [1], de cuyo modelo se parte para el diseño en un programa de CAD.

Se debe tener en cuenta el espacio de trabajo en el que pueden desplazarse los actuadores, que fue determinado en anteriores Proyectos [2] [5] y se muestra en la figura 13:

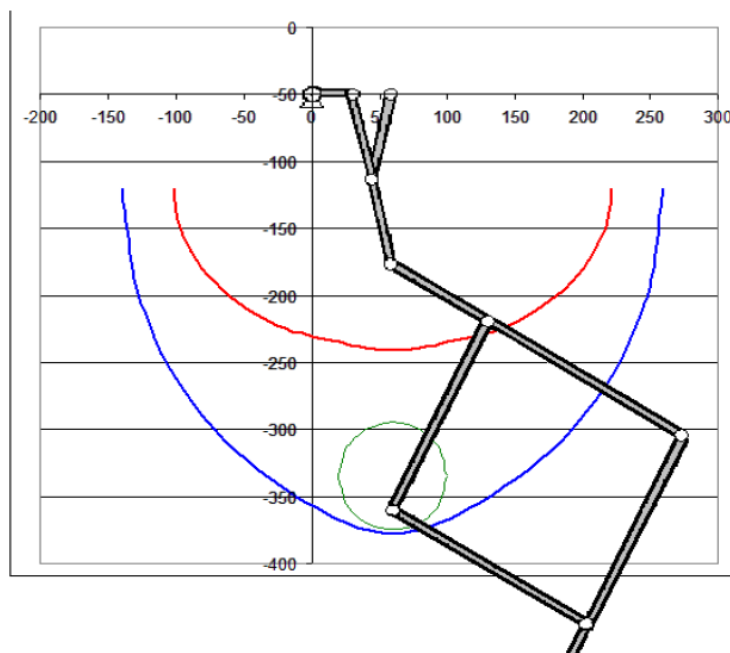


Figura 13: Espacio de trabajo.

Conocer cuál es este espacio de trabajo resulta vital a la hora de diseñar el sistema de actuadores y establecer sus dimensiones. Horizontalmente, la posición más retrasada posible del actuador es de 40 cm, y la más adelantada, de otros 40 cm. En caso de que se hiciese más largo el recorrido del mismo, se producirían colisiones y malos funcionamientos del mecanismo apareciendo aceleraciones y momentos demasiado altos para el posible funcionamiento del robot.

Con la adición de los actuadores, la máxima zancada que el pie podría llegar a realizar sería de 522 mm, y la mínima de 42,5 mm. Todas las demás posiciones serían realizables dentro de las posibilidades que ofrezcan los rozamientos y en definitiva la estabilidad del MIMBOT.

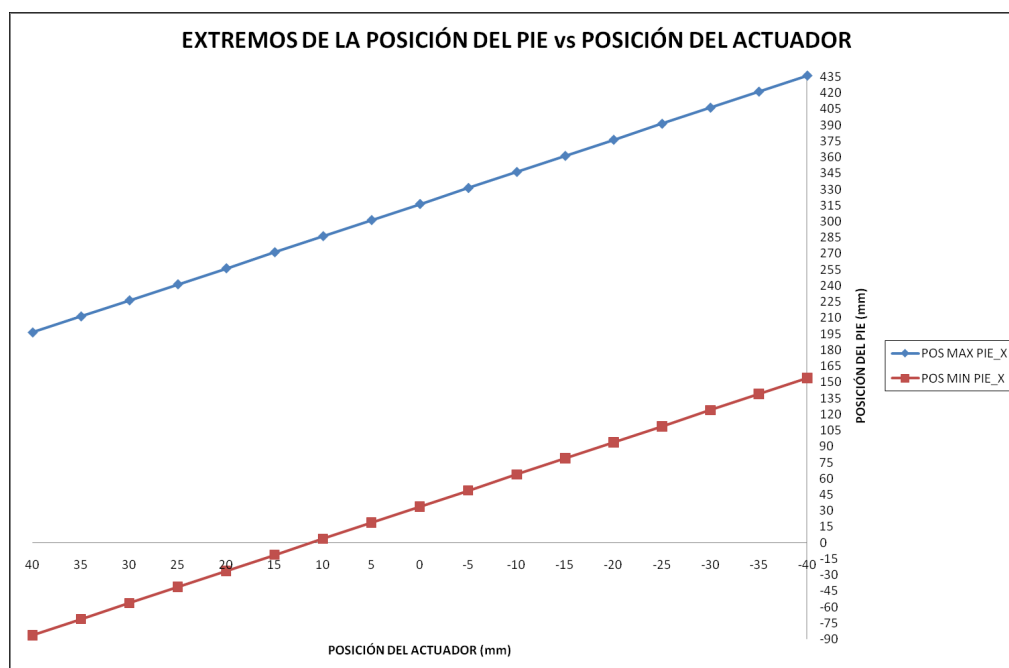


Figura 14: Extremos del pie vs Posición del actuador.

A raíz del desarrollo del MIMBOT, también surgen Proyectos que contemplan la programación con Matlab de un *software* que hace posible la obtención de las gráficas de las posiciones, velocidades y aceleraciones de los puntos más significativos de la pierna, la evolución angular, velocidades angulares y aceleraciones angulares de los elementos y las posiciones, velocidades y aceleraciones de los centros de masas de los elementos, así como del sistema global.



Capítulo III:

DISEÑO DEL MIMBOT

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SOLID EDGE ST (WITH SYNCHRONOUS TECHNOLOGY).

Programa de diseño asistido por computador (CAD). Se trata de una versión mejorada y optimizada de las anteriores versiones de Solid Edge, el programa de diseño más utilizado por las empresas de ingeniería.

Algunas de sus principales mejoras son:

- Capacidad de modificar directamente la geometría de otros CAD como Catia, Pro-E, Solid Works, Inventor, con una potencia increíble.
- Capacidad de modificar la geometría de una pieza en 3D directamente sobre el modelo con el que se está trabajando.

Solid Edge fue originalmente desarrollado y comercializado por *Intergraph* en 1995 como uno de los primeros entornos basados en CAD para Windows NT. En 1998 fue adquirido, y posteriormente desarrollado, por *UGS Corporation*. En 2007 fue adquirido por la División de Automatización de *Siemens AG*, y el 1 de octubre del mismo año la empresa *UGS* fue nombrada como *Siemens PLM Software*.

Su *kernel* de modelado geométrico era originalmente ACIS, pero fue cambiado a Parasolid, el núcleo Parasolid es desarrollado actualmente por Siemens PLM software y es usado ampliamente como el motor geométrico de otras herramientas CAD's (Solidworks, IronCAD, MoldFlow, etc...).

Recientemente adquirido por *Siemens AG* está empezando a formar parte de todas sus plantas de producción e ingeniería por lo que está sufriendo unas mejoras considerables. Esta inclusión de Solid Edge dentro de Siemens está suponiendo muchos cambios funcionales dentro del software que lo están mejorando notablemente y está ayudando a que evolucione.

Dentro de las mejoras más notables en esta última versión ST cabe destacar la traducción de archivos de otras plataformas, lo que permitirá sin duda que se abra paso en sectores antes condenados al uso de un determinado software por la falta de compatibilidad de sus archivos con otros paquetes de CAD, esto le permite editar información de otras herramientas CAD (Autodesk Inventor, Solidworks, Pro Engineer, IronCAD entre otras). Entre sus similares encontramos: *Autodesk Inventor, Solidworks, Pro Engineer* [25].

Desde su nacimiento en 1995 hasta la actualidad se han lanzado al mercado 21 versiones de *Solid Edge*®, cada una de ellas mejorada y optimizada. A continuación se muestra una tabla con los diferentes años de lanzamiento de cada una de las versiones:

Solid Edge with Synchronous Technology®, es el software más avanzado del mercado en lo referente al diseño mecánico. Representa una auténtica revolución dentro del sector de los programas de diseño mecánico que existen actualmente en el mercado. Ayuda a los fabricantes a introducir en el mercado sus productos en el menor tiempo, con la mayor calidad y con el menor coste posible.

La nueva versión de Solid Edge extiende *synchronous technology* en el modelado central de partes y ensambles para la creación de operaciones complejas y herramientas avanzadas de edición de bocetos que reduce el tiempo total de diseño. Para mejorar la migración de datos de 2D a 3D, Solid Edge convierte las dimensiones 2D de dibujos importados a dimensiones 3D durante la creación del modelo, así, los usuarios pueden editar diseños 3D basados en la intención del 2D. Adicionalmente, Live Sections puede ser utilizada para simplificar los cambios en modelos 3D permitiendo que los usuarios 2D editar cortes de sección a través de cualquier parte del modelo 3D, y actualizar el modelo 3D en tiempo real.

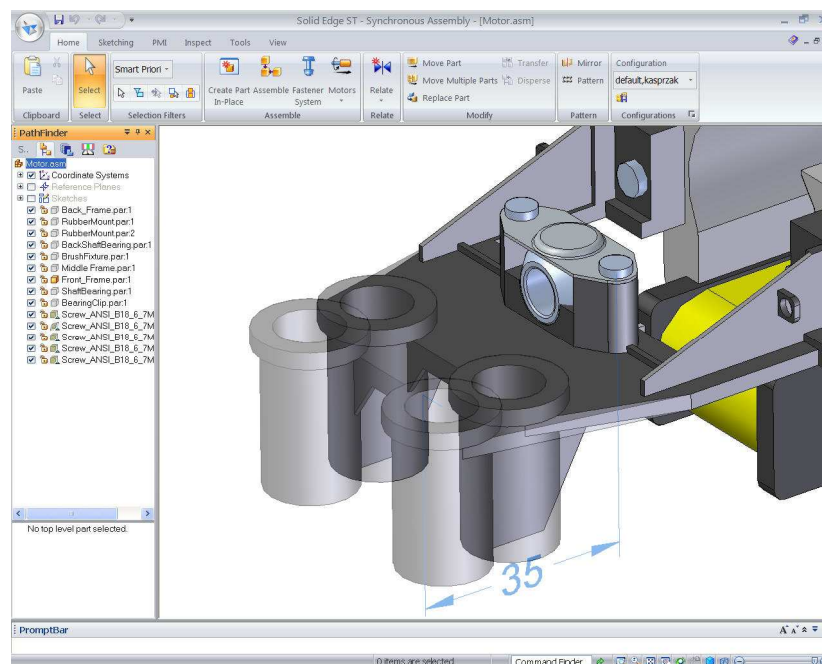


Figura 15: Aspecto del interfaz de Solid Edge ST.

El Simulador Solid Edge es una nueva herramienta de análisis opcional integrada al sistema CAD que permite la validación del diseño de partes y ensambles en la etapa temprana del proceso de desarrollo del producto para tener un tiempo de lanzamiento al mercado más rápido y reducción de costos de prototipos físicos. Está basado en el ya probado software de modelado de elemento finito Femap® y en la tecnología de algoritmo NX™ Nastran® ya integrados en la interfaz de usuario de Solid Edge. Es fácil de utilizar para diseñadores e ingenieros y promueve el incremento del uso de simulación en Solid Edge, incentivando la innovación en el diseño. El Simulador Solid Edge también aprovecha *synchronous technology* para facilitar la preparación de simulación de modelos y agilizar los refinamientos en el diseño.

Esta nueva versión se diferencia del resto de sus antecesoras en tres pilares fundamentales:

- **Máxima rapidez.** Incrementa la velocidad del diseño hasta 100 veces, gracias a la supresión de elementos innecesarios. Además, consigue reducir hasta 8 veces el tamaño de los archivos, por lo que agiliza su funcionamiento y reduce el espacio en los servidores y tráfico de red.

- *Máxima compatibilidad.* Es el único programa capaz de trabajar sin ningún tipo de problema con proyectos realizados con diferentes programas de diseño mecánico de CAD. De esta forma no se pierde tiempo en rehacer proyectos de otros fabricantes ya que la compatibilidad con todos es real y eficaz.
- *Máxima facilidad de uso.* La imagen estándar del nuevo interface se adapta a los programas más utilizados del mundo, a los que los usuarios están más habituados (entorno Microsoft). Los comandos están adaptados ergonómicamente a la forma habitual de trabajo de los profesionales del diseño, con herramientas exclusivas y multifuncionales para aumentar su productividad.

Solid Edge with Synchronous Technology supone una revolución en el diseño digital, con nuevas características:

- Máxima rapidez con el nuevo diseño interactivo.
- Nuevas herramientas para obtener resultados más rápidos.
- Diseña con cotas en 3D.
- Toda la flexibilidad que se requiere en el trabajo.
- Reconoce y mantiene la intención del diseño con Reglas Activas.
- Edita operaciones sin regeneración.
- Edita la geometría sin importar el orden de la creación.
- Edita información CAD externa más rápido que en el lenguaje nativo.
- Selecciona automáticamente geometría basada en operaciones.
- Utiliza las herramientas que realizan ediciones a cualquier modelo como si fuera su lenguaje propio.
- Aprovecha el poder de 3D con la simplicidad de 2D.

3.2. INTRODUCCIÓN A LA FASE DE DISEÑO.

En el anterior capítulo se han expuesto las anteriores modificaciones de las que ha sido objeto el diseño inicial del PASIBOT, todas ellas con unos objetivos que se pueden resumir a grandes rasgos en: conseguir la mayor estabilidad posible en el movimiento del robot e implementar nuevas trayectorias en su caminar, como las curvilíneas, y funciones como alargar o acortar el paso, subir o bajar escaleras, etc.

Para conseguir tales fines, las modificaciones sobre el diseño inicial se centran en la cadera del PASIBOT. Los cambios consisten, en su mayoría, en la adición de actuadores de distintas características y trayectorias. Para ser instalados correctamente, es necesario realizar ciertos cambios sobre el diseño inicial de la cadera, y esto es en lo que se centra este capítulo, dedicado al diseño de las nuevas piezas.

La modificación se efectúa con el programa Solid Edge, ya que es el entorno en el que se han realizado todos los anteriores diseños y el inicial. Este programa es ideal para diseñar o modificar cualquier pieza del PASIBOT al antojo del usuario. Posteriormente, se incluirá en el conjunto del robot y se establecerán las relaciones de las nuevas piezas con el resto.

Una vez obtenido el conjunto definitivo del nuevo diseño del PASIBOT, el programa ofrece una herramienta, el entorno Motion, mediante la cual se pueden agregar motores y, gracias a ellos, recrear el movimiento del robot por primera vez de una forma sencilla. De este modo, se puede comprobar que las relaciones entre las piezas del robot son correctas y que no se producen colisiones entre ellas, aunque para simular el comportamiento físico del robot de una forma adecuada y aproximada a la realidad el entorno Motion resulta demasiado simple y se ha de recurrir a un programa más avanzado.

Como suele ocurrir en todo proceso de diseño, el primer modelo propuesto no resultó ser el definitivo; se llevaron a cabo una serie de diseños preliminares, que fueron desechados por distintos motivos, antes de llegar al diseño finalmente escogido. En este capítulo, se describirán, en primer lugar, las diferentes propuestas que fueron diseñadas con Solid Edge y que no pasaron esta fase de diseño para, finalmente, describir con mayor detalle la modificación definitiva, que fue implementada para su posterior estudio en un programa informático simulador de mecanismos.

3.3. IDEAS PREVIAS.

La idea con la que se partió a la hora de plantearse en qué iba a consistir el nuevo diseño fue la de intentar reunir en la cadera las diferentes mejoras que se habían implementado en anteriores Proyectos para estabilizar y ampliar los movimientos del robot, además de agregar una nueva modificación que aún no había sido diseñada. Ésta consistiría en lograr el funcionamiento combinado de dos actuadores en la zona inferior de cada lateral de la cadera, uno con un desplazamiento lineal vertical, y el otro con un desplazamiento lineal horizontal. En un Proyecto anterior [2], ya se habían instalado actuadores desplazándose horizontalmente, pero al exigir además el movimiento vertical deberá hallarse la manera de reunir ambos movimientos a la vez. En cada uno de los apartados de este capítulo se explicará con detalle cómo se intentó llevar a cabo dichas actuaciones para cada propuesta de diseño de la cadera.

Debido al mencionado deseo de mantener la modificación del estabilizador, en cada una de las propuestas no se partió de la cadera original, sino que se tomó un diseño de uno de los Proyectos realizados con anterioridad [1], en el cual el estabilizador se mantiene horizontal gracias a que se mueve a lo largo de una deslizadera que se desplaza horizontalmente y que, a su vez, recorre una guía vertical abierta en la cadera del PASIBOT.

3.4. PRIMER MODELO.

La primera propuesta de diseño se presenta a continuación:

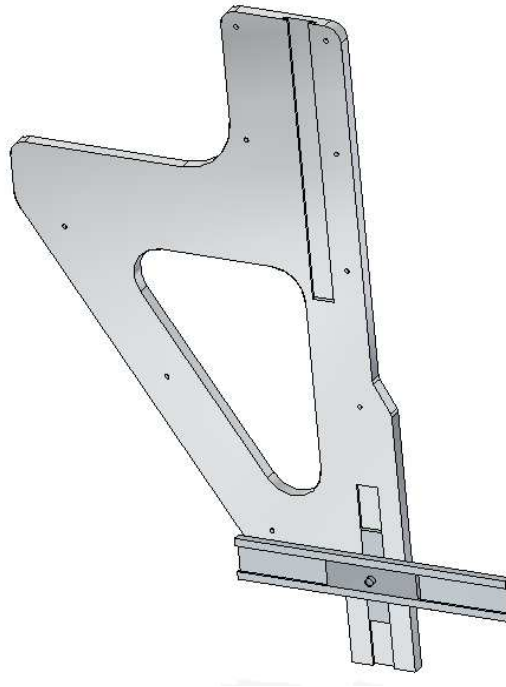


Figura 16: Primera propuesta de diseño.

Como se puede observar en la figura 16, la modificación consistió en añadir una guía vertical en la zona inferior de la cadera, por la cual se desplaza una deslizadera que, a su vez, sirve como guía para un actuador que se desplaza horizontalmente. En la figura se refleja la posición inicial del conjunto, en la que el centro del actuador coincide con el punto original en el que se unen tendón superior e inferior a la cadera y, a la vez, entre sí.

Además, ha debido efectuarse una modificación importante en el perfil de la cadera, consistente en:

- Prolongar verticalmente el tramo de la cadera en el que se encuentra alojada la guía para la deslizadera, para que ésta pueda realizar todo el recorrido deseado a lo largo de la guía.
- Ensachar la zona de la cadera en la que se aloja la guía, para que ésta disponga de espacio donde ser situada. El incremento de anchura también proporciona resistencia extra en una zona que va a encontrarse sometida a diversos esfuerzos provocados por el movimiento del paso del robot.

Ninguna de las dos operaciones se realiza a lo largo de todo el perfil con el fin de ahorrar material y, por tanto, costes. Además, de esta manera se consigue cambiar el aspecto de la nueva cadera lo mínimo posible con respecto a la original. Por otra parte, la suave pendiente que existe en la transición de la zona ensanchada al perfil original se ha ejecutado de esta manera, principalmente, por motivos estéticos que hacen más atractivo el diseño.

Todo ello se muestra en la figura 17, en la que se compara el nuevo diseño de la cadera con el diseño de partida:

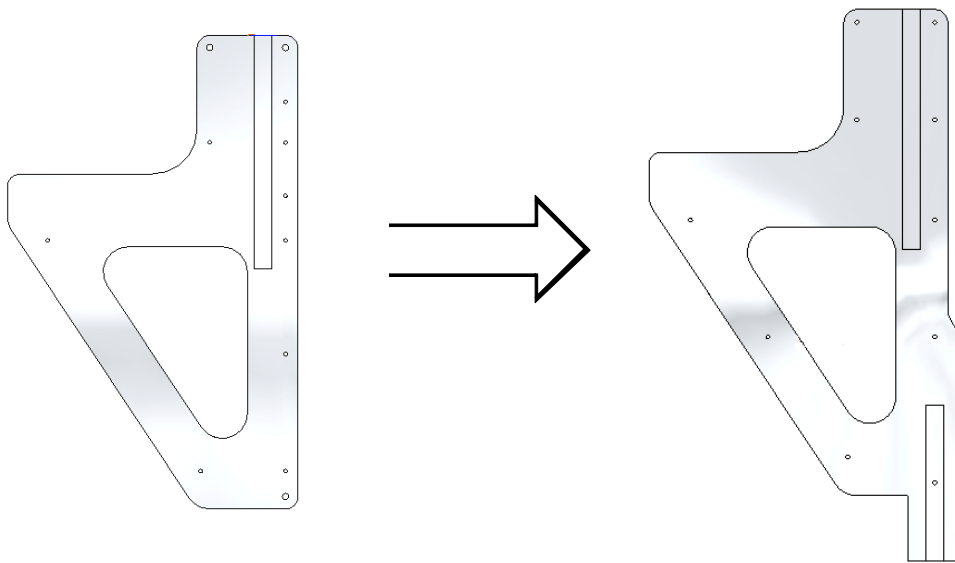


Figura 17: Comparación entre diseño anterior y primera propuesta.

Para este diseño se ha considerado que el pequeño motor eléctrico que movería la deslizadera sería instalado en la parte exterior de la cadera, situándose sobre la guía.

Además de la nueva cadera, se diseñaron con Solid Edge las otras dos piezas necesarias, que son la deslizadera y el actuador que por ella se desplaza (figs. 18 y 19).

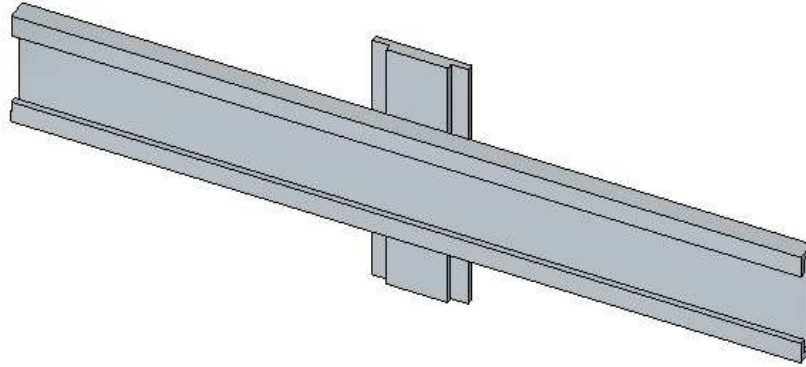


Figura 18: Deslizadera con guía para el actuador.

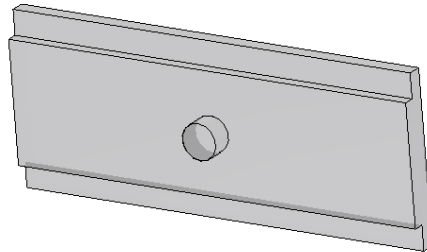


Figura 19: Actuador horizontal.

Este actuador se ha diseñado de forma que pueda desplazarse longitudinalmente por la guía de la deslizadera sin salirse de ella, y en su centro se articularían los tendones superior e inferior del PASIBOT.

Variante de la modificación.

En este apartado se expondrá una variante de la primera propuesta, que conlleva una pequeña modificación extra en el diseño de la cadera.

Esta variante (fig. 20) ha sido planeada contemplando la posibilidad de que la deslizadera con el actuador sea instalada por la parte interior de la cadera. De este modo, además de abrir la guía para la deslizadera por el interior de la cadera, resulta necesario efectuar un vaciado que la atraviese y recorra parte de la zona de la guía para la deslizadera, con el fin de que el motor que mueve dicha deslizadera, que queda en el exterior de la cadera, pueda mantenerse conectado a ella a lo largo de todo su recorrido.

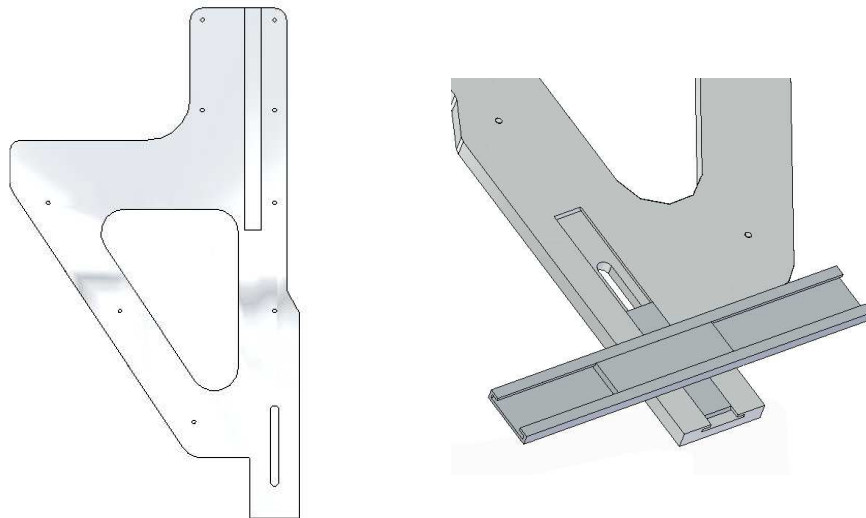


Figura 20: Variante de la primera propuesta vista desde el exterior y el interior de la cadera.

3.5. SEGUNDO MODELO.

La segunda propuesta para el diseño de la nueva cadera (fig. 21) dispone de los mismos elementos que la anteriormente explicada, pero cambia el concepto: en vez de una prolongación vertical por la que discorra una deslizadera con guía horizontal, se desarrolla una prolongación horizontal por la que se desplaza una deslizadera con guía vertical para el actuador.

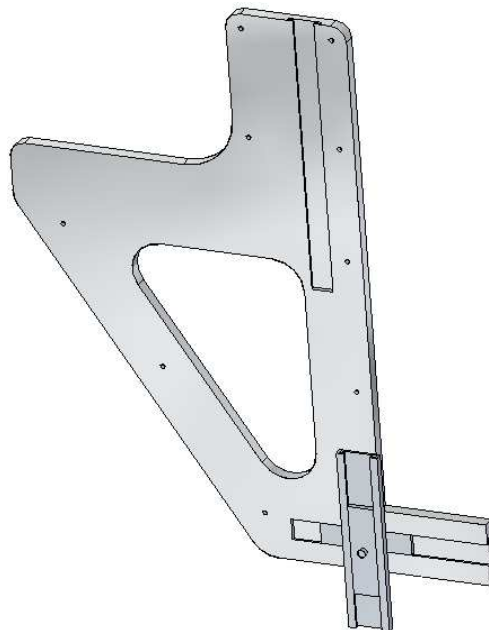


Figura 21: Segunda propuesta de diseño.

De este modo, se consigue un movimiento similar al obtenido con la primera propuesta, ya que el actuador puede seguir moviéndose en vertical a lo largo de la deslizadera, que en este caso se ha inclinado de forma que pueda recorrer horizontalmente la prolongación de la cadera.

Esta modificación se parece a la que se llevó a cabo en el Proyecto [2], aunque se diferencia en cuanto a que la guía para la deslizadera se encuentra en la cara exterior de la cadera y que, como es natural, se añade el movimiento vertical del actuador.

A continuación, en la figura 22, se muestra la comparación entre la cadera anterior y la nueva cadera modificada.

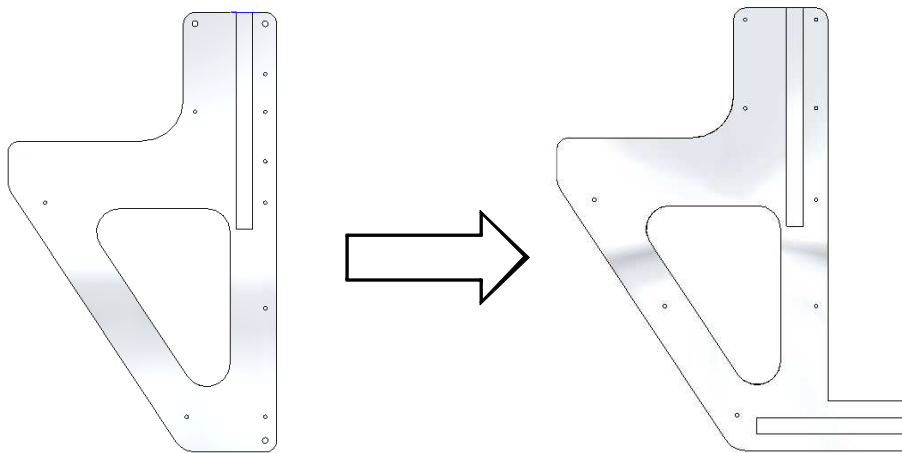


Figura 22: Comparación entre diseño anterior y segunda propuesta.

En cuanto a la deslizadera y al actuador, no resulta necesario cambiar su diseño y sus dimensiones son las mismas que en el caso anterior; lo que sí varía es la orientación.

El inconveniente que presenta este diseño es, al igual que en el caso anterior, lo sustancioso de la modificación que es necesaria realizar, ya que obliga a rediseñar el perfil de la cadera con el fin de que aloje la guía para la deslizadera en toda su longitud.

3.6. MODELO DEFINITIVO.

Las dos primeras propuestas para el diseño de la nueva cadera cumplirían previsiblemente con corrección las funciones para las cuales fueron ideadas; no obstante, se siguió tratando de hallar una forma de reunir todas las mejoras en un diseño que supusiera una modificación menos aparatosa del perfil de la cadera.

Así pues, se llegó a la conclusión de que podía aprovecharse el diseño para el nuevo estabilizador realizado anteriormente [1] de la siguiente forma: se prolongaría la vía para la deslizadera del estabilizador hasta el borde inferior de la cadera, recorriendo toda su extensión.

Por otra parte, se ideó una nueva deslizadera en forma de T invertida, con el actuador alojado en la guía que forma su tramo horizontal. El aspecto que muestra el diseño definitivo del conjunto se aprecia en la figura 23, y se explica detalladamente a lo largo de las siguientes páginas, en las cuales ya se denominará MIMBOT, por incluir los nuevos actuadores.

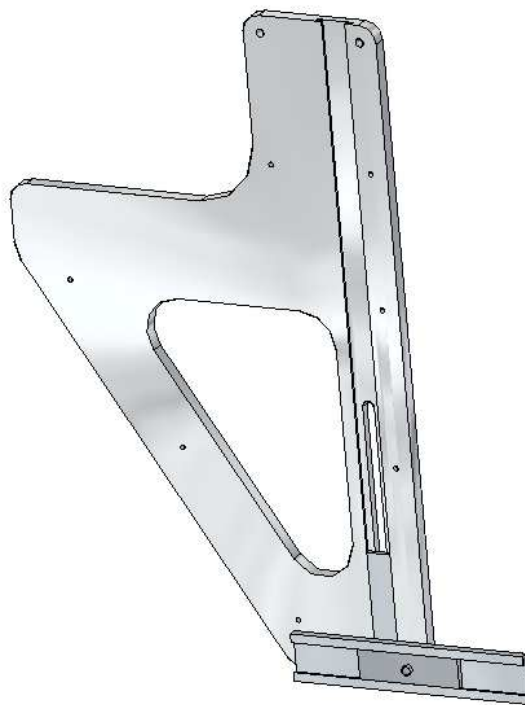


Figura 23: Propuesta de diseño definitivo.

La razón por la que se confió en este diseño por encima de las propuestas anteriores es que, gracias a él, se consigue evitar la modificación drástica del perfil de la cadera anterior, siendo necesarias únicamente dos operaciones para su consecución: por una parte, la vía que recorre la cadera de arriba abajo y que aloja tanto la deslizadera del estabilizador como la del nuevo actuador y, por otra, el hueco necesario para que el motor que mueve la deslizadera en sentido vertical pueda conectar con ella, ya que dicho motor se alojaría en la cara interior de la

cadera. Estas modificaciones se aprecian con claridad en la siguiente comparación con la cadera anterior:

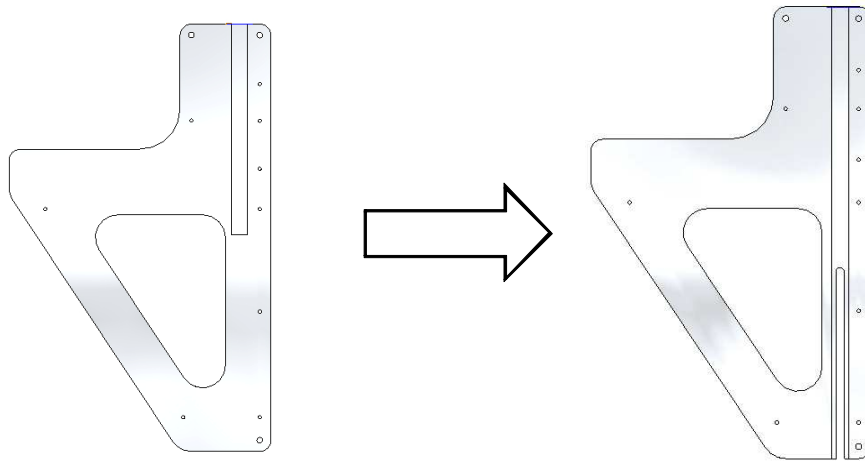


Figura 24: Comparación entre diseño anterior y propuesta definitiva.

Se ha comentado anteriormente que el motor que mueve la deslizadera se instalará por la cara interior de la cadera, a diferencia de lo que ocurría en anteriores modelos. Se optó por ello tras considerar que, al encontrarse los motores en el interior de la cadera, además de quedar ocultos junto al resto de mecanismos del motor principal, de este modo no originarían tantas inestabilidades durante el andar del robot. Si, por el contrario, los motores se instalaran en el exterior de la cadera, al encontrarse más alejados del c.d.m. del robot, sus peso añadidos podrían influir más negativamente en la estabilidad del conjunto. Esta opción implicaría el rediseño de la cadera interior que soporta los elementos de transmisión del robot, en busca de un diseño que permita la inclusión de los motores de los actuadores en el interior de la cadera y el hueco abierto a lo largo de la guía de las deslizaderas. Es por ello por lo que, en este Proyecto, no se ha tenido en cuenta la cadera interior del modelo.

La posibilidad de que se produzca el desplazamiento del actuador tanto vertical como horizontalmente viene dada por el particular diseño de la nueva deslizadera. La mencionada anteriormente forma de T invertida que se le ha proporcionado permite que la trayectoria horizontal del actuador se mantenga gracias a la guía de la deslizadera, mientras que la trayectoria vertical se consigue con el recorrido de la deslizadera, que puede introducirse hacia el centro de la cadera, o bien alejarse de él dejando que sobresalga por debajo de la misma. De esta forma, resulta innecesaria cualquier prolongación de la cadera.

A continuación, en la figura 25, se muestra la nueva deslizadera en T.

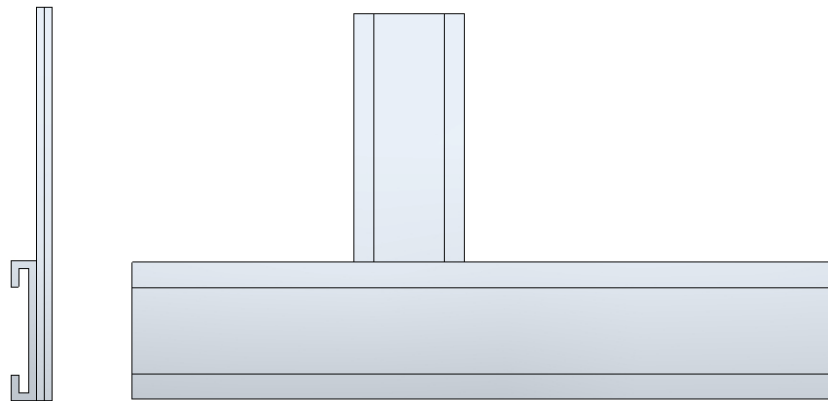


Figura 25: Vistas de la deslizadera en forma de T invertida.

Como se aprecia en la figura, la deslizadera no es simétrica, ya que la vía se prolonga más hacia la derecha que hacia la izquierda. Esto se debe a que la vía por la que se desplaza esta pieza no pasa exactamente por el punto en el que se unen los tendones superior e inferior con la cadera (en lo que sería la posición inicial del actuador); de este modo, dicho punto queda justo en la mitad de la guía de la deslizadera y el actuador puede recorrer la misma distancia tanto en un sentido como en el otro. Esto se verá más claramente más adelante, en unas figuras que muestran el conjunto del actuador más la deslizadera implementados en la nueva cadera.

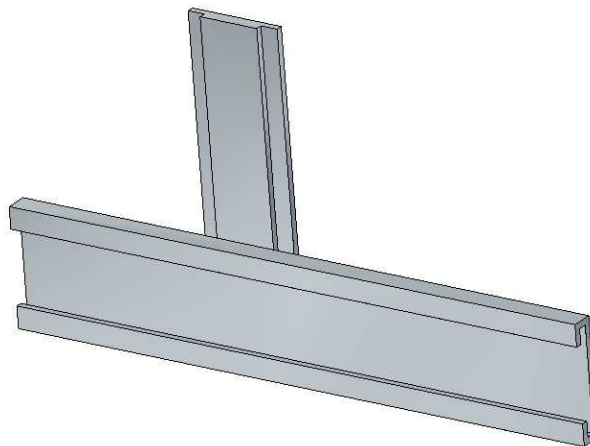


Figura 26: Vista en perspectiva de la nueva deslizadera.

La distancia que se le va a permitir recorrer al actuador, tal y como se calculó en anteriores Proyectos [2] [5] y se resume en el apartado 2.3. del presente Proyecto, es de 40 cm en la dirección positiva del eje X, y de otros 40 cm en la dirección negativa, lo cual suma 80 cm de recorrido total que puede efectuar el punto de articulación de los tendones superior e inferior.

Dado que la longitud del actuador horizontal va a ser de 6 cm, hay que contar con 3 cm más a cada lado, por lo que la guía horizontal de la deslizadera posee una longitud total de 14 cm.

Este tipo de consideraciones no son aplicables al movimiento vertical de los actuadores, dado que la guía de la cadera se aplica a lo largo de toda su superficie, con lo que los límites al recorrido vertical de la deslizadera vienen dados por parte de la futura implementación de las funciones que definen su movimiento.

Por otra parte, no se ha visto necesario modificar el diseño del actuador alojado en la deslizadera:

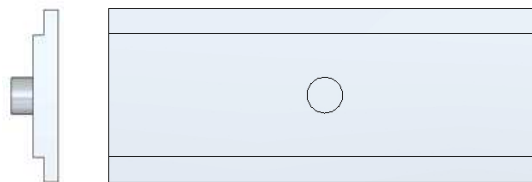


Figura 27: Vistas del actuador.

El punto central del actuador se situará en su posición de inicio en el punto de la cadera donde se articulan tendón inferior y superior.

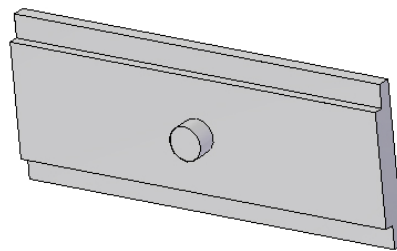


Figura 28: Vista en perspectiva del actuador.

Una vez se dispone de los nuevos diseños de cada pieza del subconjunto cadera-deslizadera-actuador, se comprobó en el entorno Conjunto de Solid Edge que las dimensiones de las tres piezas eran, tal y como se había planeado, las adecuadas para que pudieran actuar entre sí.

A partir de ahora, se describirá el proceso de ensamblaje del subconjunto antes citado, que es al que se ha prestado mayor atención en este Proyecto, para proseguir después con el montaje

del subconjunto en el modelo completo del MIMBOT y comprobar si son necesarias otras modificaciones.

En primer lugar, en la figura 29 se muestra el conjunto de la deslizadera con el actuador ya instalado en su guía:

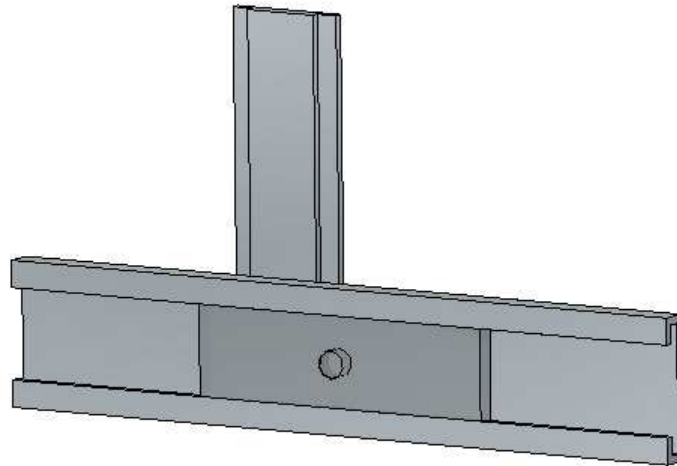


Figura 29: Deslizadera con el actuador.

Posteriormente, la deslizadera se instala en la guía de la cadera. En la figura 30 se muestra el conjunto visto tanto desde el exterior como del interior de la cadera:

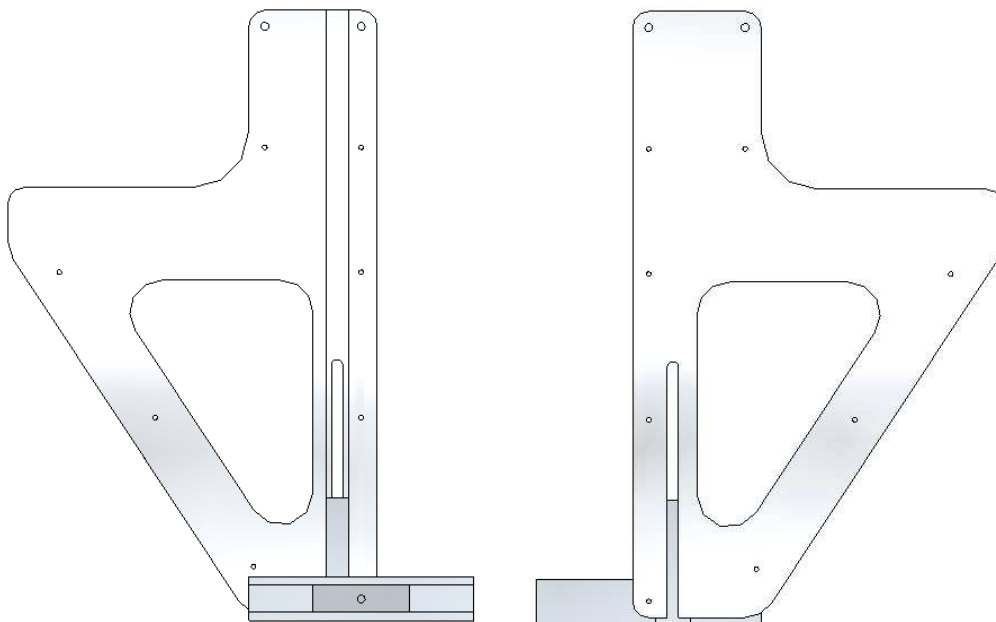


Figura 30: Vistas de la cadera desde el exterior y el interior.

Para mostrar claramente que la posición inicial del actuador se encuentra exactamente en el punto de la cadera donde originariamente se articulaban los tendones superior e inferior, se ha tomado una imagen (fig. 31) en la que se ha restado opacidad a deslizadera y actuador, para poder apreciar la cadera, que se encuentra detrás:

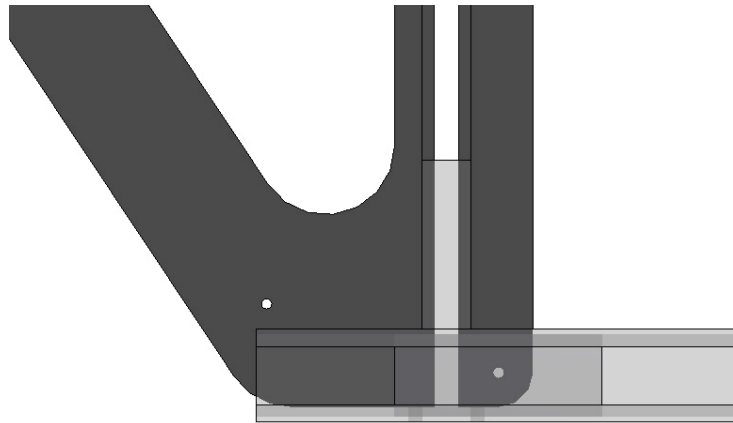


Figura 31: Vista detallada de la posición inicial del actuador.

Hasta ahora se ha venido mostrando únicamente el lateral derecho de la cadera para una mayor claridad en la comprensión de la modificación, pero ésta se realiza en ambos laterales, y el conjunto de la cadera resultante ofrece este aspecto:

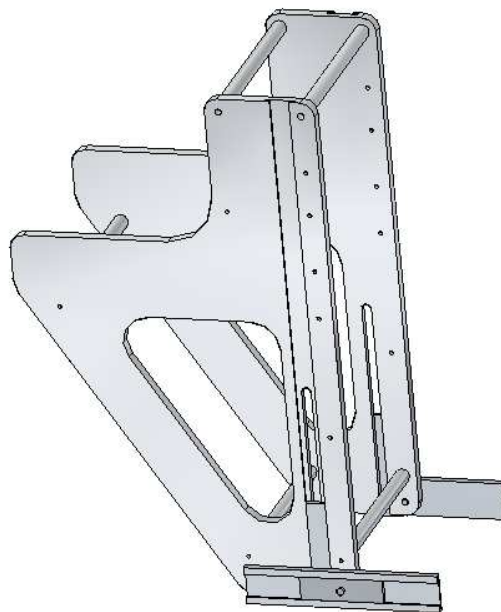


Figura 32: Cadera completa con deslizaderas y actuadores.

Se ha prescindido del montaje de la cadera interior instalada en anteriores Proyectos para sostener el conjunto de los mecanismos internos que dan movimiento al MIMBOT, debido a que, con su actual diseño, interfiere en la nueva modificación realizada a la cadera, más concretamente con el hueco de la guía y los actuadores instalados por el interior de la cadera. Este Proyecto se centra en el diseño y funcionalidad de los nuevos actuadores, por lo que queda pendiente la reforma de la cadera interior para adaptarla a la nueva cadera exterior.

Para el montaje del MIMBOT completo en Solid Edge, se tomaron el resto de las piezas del anterior modelo, incluyendo el estabilizador, y se instalaron sobre la cadera. En primer lugar, se instaló únicamente una pierna, la derecha, con el fin de probar que las relaciones entre piezas se habían establecido correctamente y, después proceder con la pierna izquierda. El montaje quedó de la forma mostrada en la figura 33:

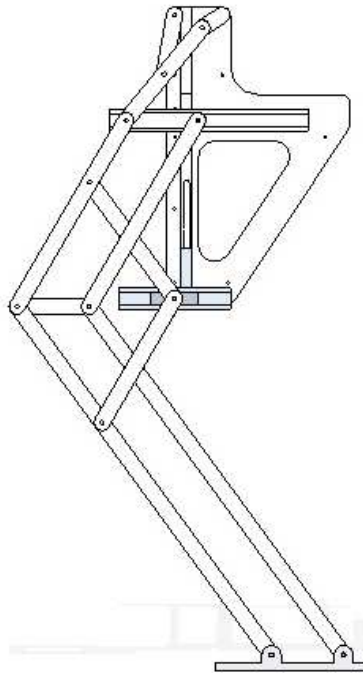


Figura 33: Montaje del lateral derecho.

En principio, se había pensado que no serían necesarias más modificaciones sobre el diseño original del PASIBOT; no obstante, al efectuar el montaje, se comprobó que la nueva deslizadera en T podía ocasionar un conflicto con la pierna. Este problema consistía en que, dado que la deslizadera se encontraba en el mismo nivel que la tibia y el peroné, cabía la posibilidad de que las piezas colisionaran entre sí a lo largo del paso con el robot en movimiento.

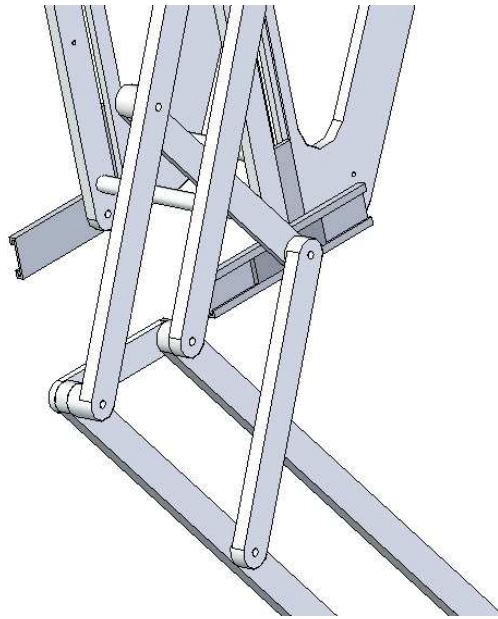


Figura 34: Detalle de la zona de la colisión.

La rodilla también se consideró una pieza conflictiva, dado que se encuentra a un nivel inferior al de la tibia y el peroné y se encuentra en contacto con ambos. En la figura 35 se puede observar cómo las mencionadas piezas se encuentran en los mismos niveles:

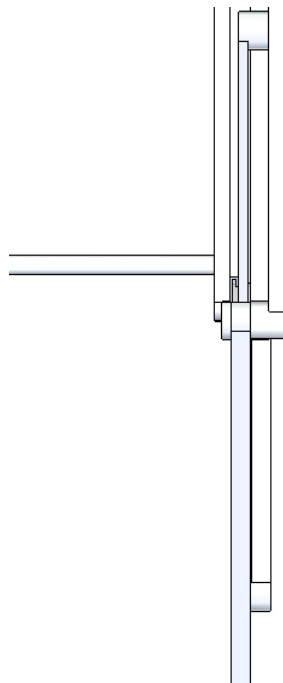


Figura 35: Vista frontal de la zona conflictiva.

Para resolver el problema planteado, se decidió reestructurar la nivelación de las distintas piezas de las piernas, de la manera mostrada en la figura 36: el contrafémur, que anteriormente se encontraba a distinto nivel que el fémur, se posicionó en su mismo plano; la tibia y el peroné continuaron siendo conectadas a fémur y contrafémur por el interior de la pierna, pero la rodilla pasó a instalarse en el exterior, tomando contacto entonces con el fémur y el contrafémur.

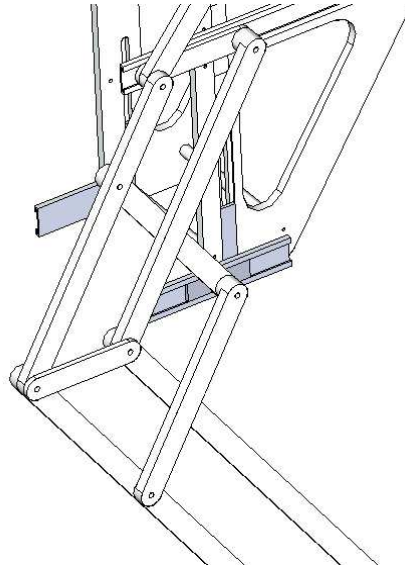


Figura 36: Nueva configuración de los niveles de las piezas de la pierna.

Con los cambios llevados a cabo se consiguió que las piezas de la pierna y la deslizadera dejaran de estar al mismo nivel (fig. 37) y, por tanto, se logró evitar la posibilidad de que se produjera alguna colisión al dar movimiento al MIMBOT.

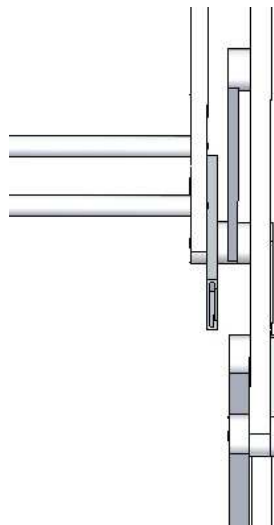


Figura 37: Vista frontal tras la nueva configuración.

En lo que a esta serie de modificaciones respecta, sólo resta mencionar que, para hacer factible el cambio de nivel de estas piezas, se debió acortar o alargar los extremos de algunas de ellas en función de las nuevas distancias a las que se articulaban con otras piezas, según se ve reflejado a continuación, en las figuras 38, 39 y 40:

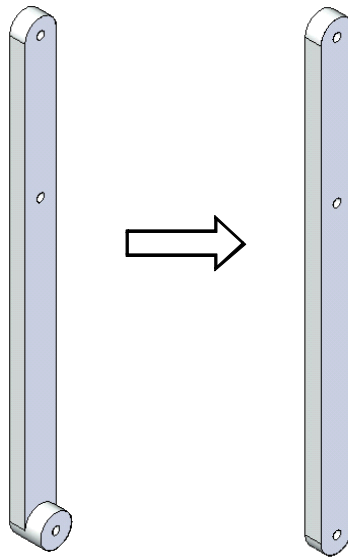


Figura 38: Modificación sobre el fémur.

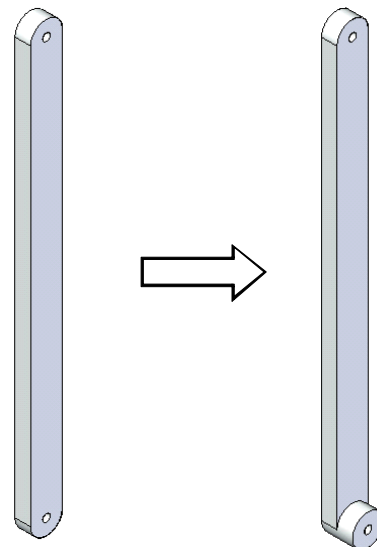


Figura 39: Modificación sobre el contrafémur.

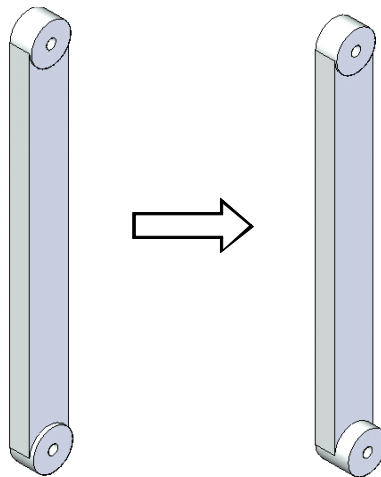


Figura 40: Modificación sobre el tendón inferior.

Una vez concluidas todas las modificaciones necesarias para el correcto montaje del robot, se procede a comprobar, ya sea de forma manual o bien posicionando un motor rotativo en la manivela, que todas las relaciones son correctas. Tras verificarlo, se puede, finalmente, montar la pierna derecha del robot, con lo que su montaje se ve finalizado. Es importante mencionar que el modelo en Solid Edge ha de quedar posicionado en el punto en el que se va a considerar como inicio del paso del robot, ya que el archivo se exportará directamente a MSC. Adams y en este programa no se modificará su posición. En nuestro caso, se posicionó con la pierna derecha adelantada (figs. 41 y 42).

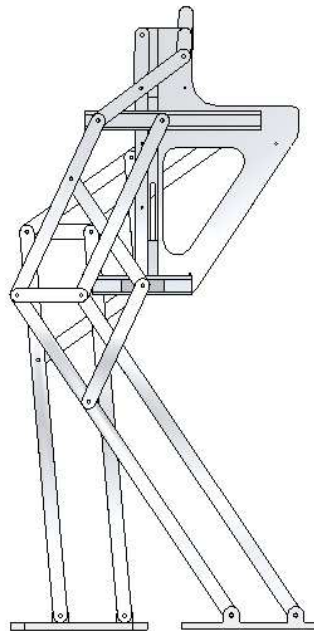


Figura 41: Vista lateral del MIMBOT definitivo.

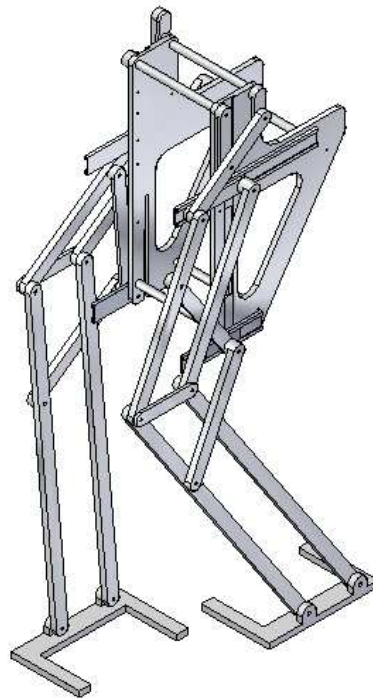


Figura 42: Vista en perspectiva del PASIBOT definitivo.

A pesar de que se planeaba realizar todas las pruebas en MSC. Adams con el modelo con la pierna derecha, más adelante se planteó observar si existía alguna diferencia entre este inicio de paso y, por el contrario, situarlo con la pierna izquierda adelantada. Con dicho fin, se retomó el modelo en Solid Edge y se le posicionó con la pierna izquierda adelantada (fig. 43), usando los comandos para mover piezas. Para conseguir con exactitud la posición de los pies, se recurrió a la relación “Alinear caras” entre las superficies inferiores de los pies, recreando así la situación en la que ambos estuvieran posados sobre el suelo.

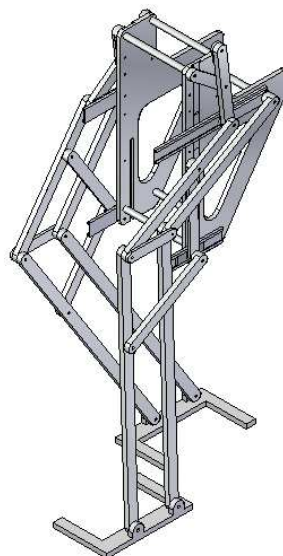


Figura 43: MIMBOT con el paso cambiado.

3.6.1. Modelo con estabilizador descolgado.

Como objetivo secundario para este Proyecto, se propuso la consecución de un modelo de MIMBOT que combinara los actuadores vertical y horizontal de la zona inferior de la cadera pero, en esta ocasión, descartando la instalación del nuevo estabilizador. El estabilizador permite que el pie se mantenga en posición horizontal, disminuyendo de este modo el impacto de los pies contra el suelo y contribuyendo a la estabilidad del conjunto.

Sin embargo, la ausencia del estabilizador proporciona al MIMBOT la opción de experimentar con su funcionamiento en pendientes. Con los actuadores instalados, se abre la posibilidad de analizar en qué manera éstos pueden influir sobre la inclinación del pie, pudiendo llegar incluso a implementar funciones de movimiento que permitan al robot modificar el ángulo de entrada del pie respecto al suelo, según la inclinación de éste sea cuesta arriba, cuesta abajo y, en cada uno de los casos, más o menos pronunciada.

Como de lo que se trata es de ofrecer un modelo de MIMBOT con el que poder llevar a cabo las simulaciones posteriormente en ADAMS y observar su comportamiento, el cambio que se ha realizado en el diseño en Solid Edge ha consistido únicamente en descolgar el estabilizador para que el mecanismo funcione igual que antes de su instalación. Se mantienen la deslizadera y la vía por la que discurre, ya que, a la hora de analizar el modelo en MSC. Adams, bastará con situar una restricción que ancle la deslizadera a la cadera del robot, con lo que ésta funcionará solamente como vía horizontal.

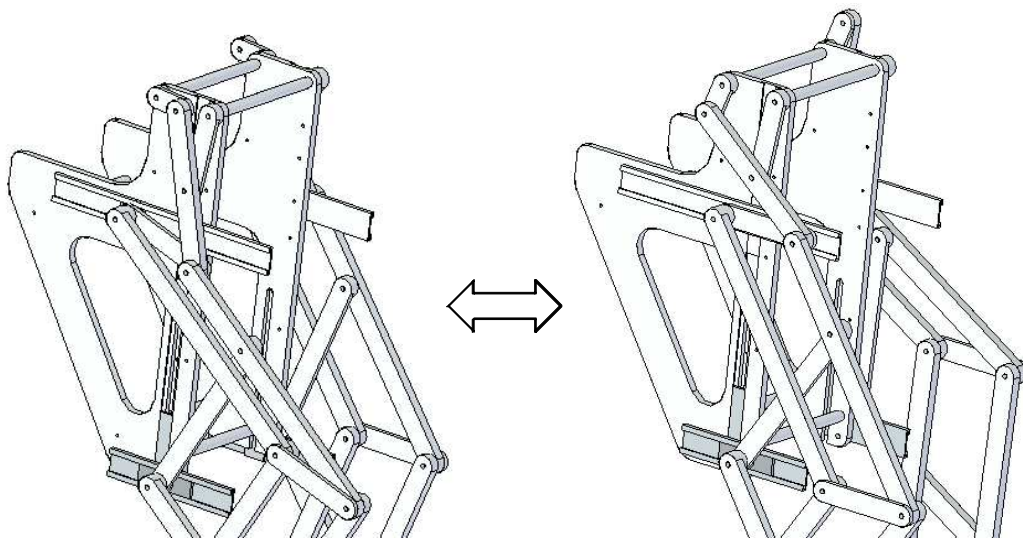


Figura 44: Estabilizador descolgado vs Estabilizador paralelo al suelo.

Para su diseño en Solid Edge, se aprovechó la parte del “nuevo estabilizador” que articula con el fémur y el contrafémur, y se añadió una pequeña deslizadera que la permitiera recorrer la guía horizontal, tal y como refleja la figura 45.

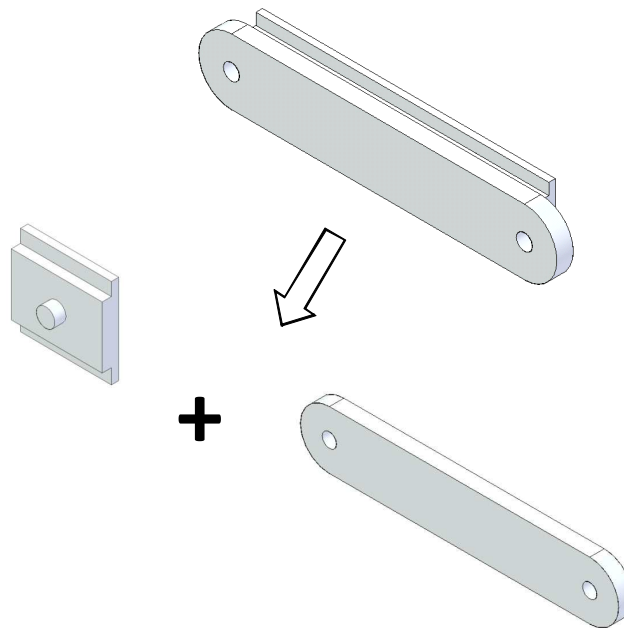


Figura 45: Evolución del estabilizador para descolgarlo.

Más adelante, se ideó una alternativa al estabilizador paralelo al suelo, que resultó ser más práctica para pasar fácilmente del modelo con este estabilizador al modelo con el estabilizador descolgado: dos deslizaderas que recorren la guía del estabilizador, articuladas en sus extremos a un eslabón que cumple la función de estabilizador. Con este diseño (fig. 46), bastaría prescindir de una de las deslizaderas para tener el modelo del estabilizador descolgado.

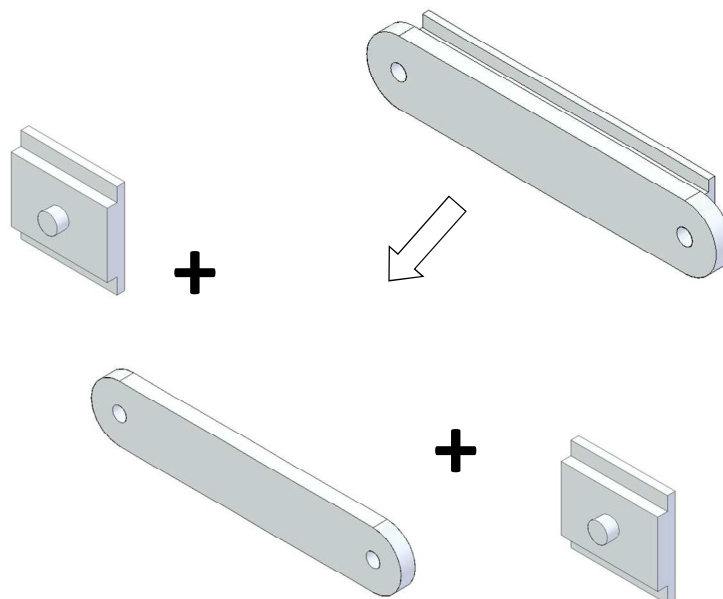


Figura 46: Alternativa para descolgar el estabilizador.



Capítulo IV:

IMPLEMENTACIÓN EN MSC. ADAMS

4.1. INTRODUCCIÓN.

Este capítulo constituye el segundo de los bloques principales de los que consta el Proyecto. Tras una minuciosa tarea de diseño en Solid Edge, el MIMBOT ya se encuentra preparado para su exportación a MSC. Adams, donde se procederá a una serie de operaciones con el fin de preparar el modelo para ser sometido a las simulaciones que se deseen realizar.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL MSC. ADAMS.

MSC. Adams es uno de los programas de análisis de movimiento y dinámica multicuerpo más utilizado en el mundo. Adams permite estudiar la dinámica de las partes móviles, analizar el modo en el que las cargas y las fuerzas se distribuyen a lo largo de los sistemas mecánicos y mejorar y optimizar el rendimiento de sus productos.

Los métodos de diseño usados tradicionalmente, basados en ir efectuando pruebas a medida que se construye, son caros, consumen mucho tiempo, y en ocasiones hacen que la tarea resulte prácticamente imposible de llevar a cabo. Las herramientas basadas en el CAD ayudan a evaluar cosas como la interferencia entre partes y el movimiento cinemático básico, pero ignoran el comportamiento dinámico basado en físicas reales de sistemas mecánicos complejos. Por otra parte, los programas que hacen uso del Método de Elementos Finitos (MEF) son adecuados para el estudio de la vibración lineal y dinámica transitoria, pero resultan poco eficientes en el análisis de grandes rotaciones y otros movimientos no lineales de sistemas mecánicos.

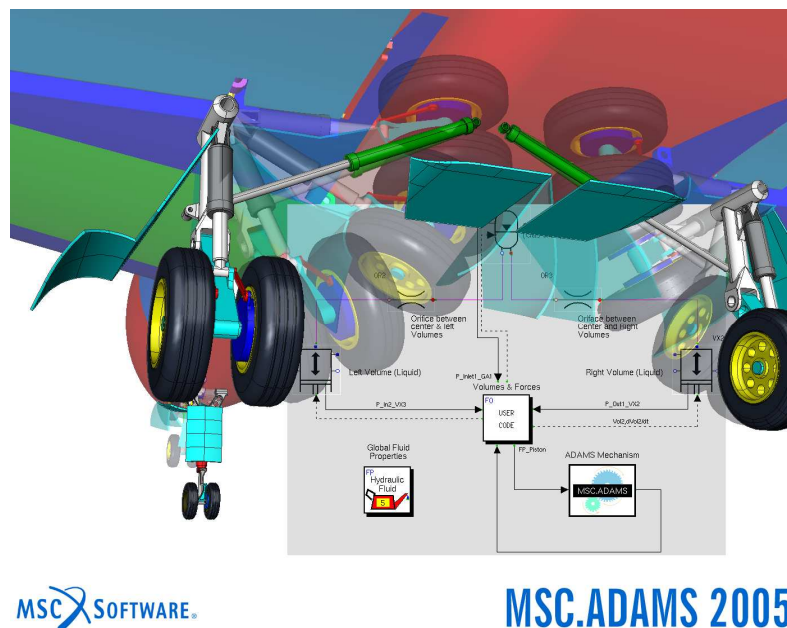


Figura 47: MSC. Adams 2005.

En cambio, este programa permite a los ingenieros crear y probar fácilmente prototipos virtuales de sistemas mecánicos en mucho menos tiempo y con menor costo que los requeridos si hubiera que construirlos físicamente y someterlos a pruebas. A diferencia de la mayoría de herramientas de CAD, Adams incorpora las físicas real resolviendo simultáneamente ecuaciones de cinemática, estática, cuasi-estática y dinámica.

Por otra parte, la tecnología de resolución de sistemas dinámicos multicuerpo que incorpora Adams le permite procesar dinámicas no lineales en mucho menos tiempo que el empleado por las herramientas de MEF. Las cargas y fuerzas calculadas por las simulaciones de Adams mejoran la precisión del MEF proporcionando un mejor cálculo de sus variaciones a lo largo de un amplio rango de movimientos y entornos operativos.

El programa MSC. Adams consta de diversos módulos opcionales, que permiten a los usuarios simular e integrar componentes mecánicos, neumáticos, hidráulicos, electrónicos y de tecnologías de control de sistemas para construir y probar prototipos virtuales que representan con precisión las interacciones entre estos subsistemas.

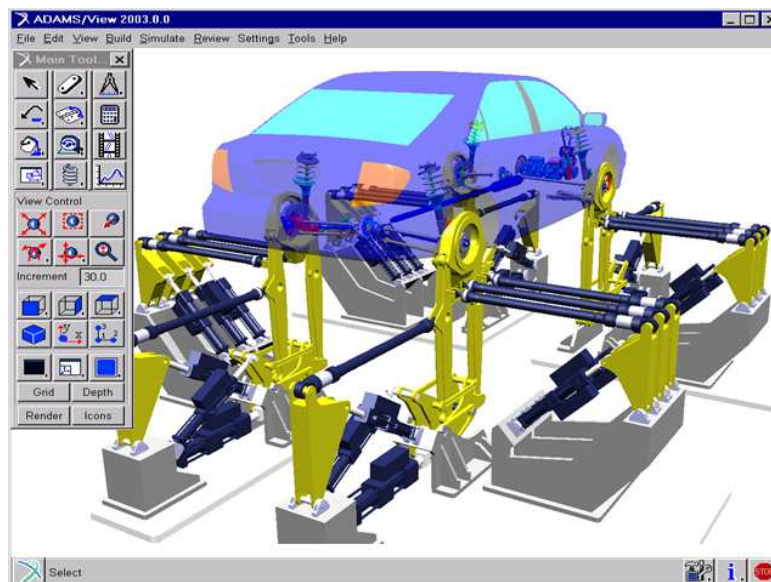


Figura 48: Aspecto del módulo Adams/View.

Concretamente, en este Proyecto se utilizará el módulo Adams/View, que es el indicado cuando se desea llevar a cabo simulaciones de un mecanismo.

Como Anexo a este Proyecto, se facilita un manual básico de manejo de MSC. Adams, redactado por alumnos de la Universidad Carlos III y que ha resultado muy útil para la elaboración de éste y anteriores Proyectos que requerían el uso de Adams, ya que generalmente el alumno no está familiarizado con este programa y un manual facilita en gran medida la primera toma de contacto con él.

4.2. PREPARACIÓN DEL MODELO EN MSC. ADAMS.

En este apartado, se detallarán los pasos preliminares que se aplicarán sobre el modelo importado, como puedan ser su correcto posicionamiento, especificar de las propiedades del material o establecer las relaciones entre piezas y restricciones de movimiento necesarias.

A lo largo del proceso se irá modificando el color de fondo de la malla de trabajo del Adams, con el fin de visualizar mejor el modelo.

4.2.1. Importación desde Solid Edge ST.

El modelo de MIMBOT que se desea estudiar se ha guardado previamente en Solid Edge como un archivo de tipo Parasolid, que posee la extensión “.x_t”. Esto es esencial para que el Adams reconozca el tipo de archivo y nos permita abrirlo y operar con él. Tras abrir el módulo Adams View, aparece la ventana de inicio de la figura 49:

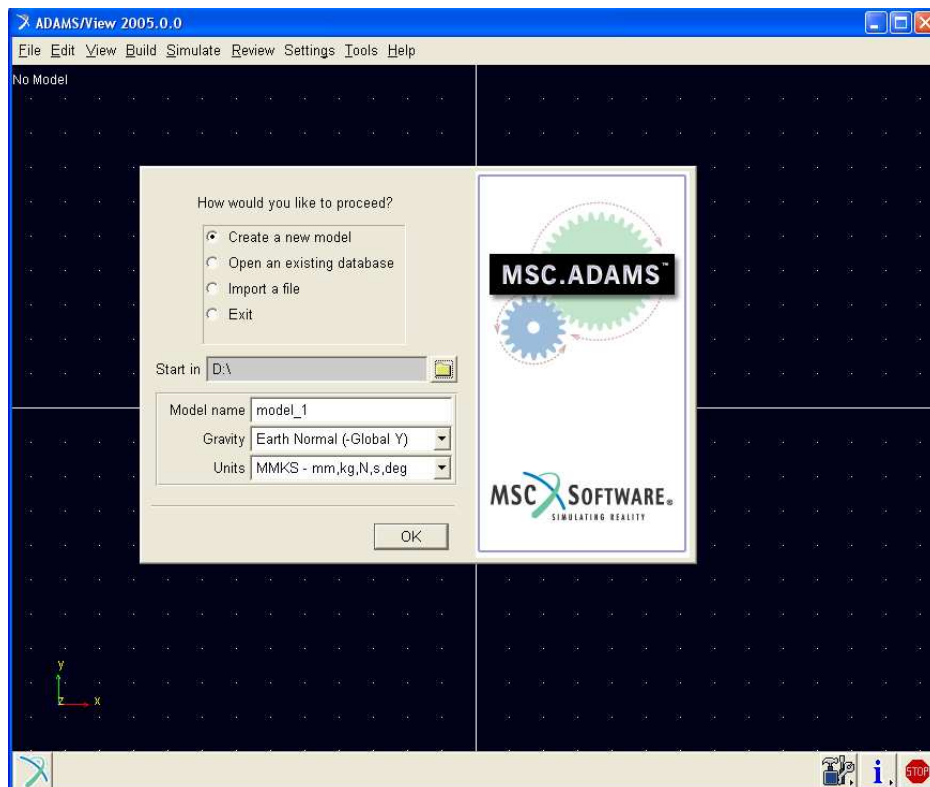


Figura 49: Ventana de inicio de Adams View.

En ella, se elige la opción “Import a file” y, en la línea de “Start in”, se podrá seleccionar la carpeta en la que queramos ir guardando nuestro trabajo con el programa.

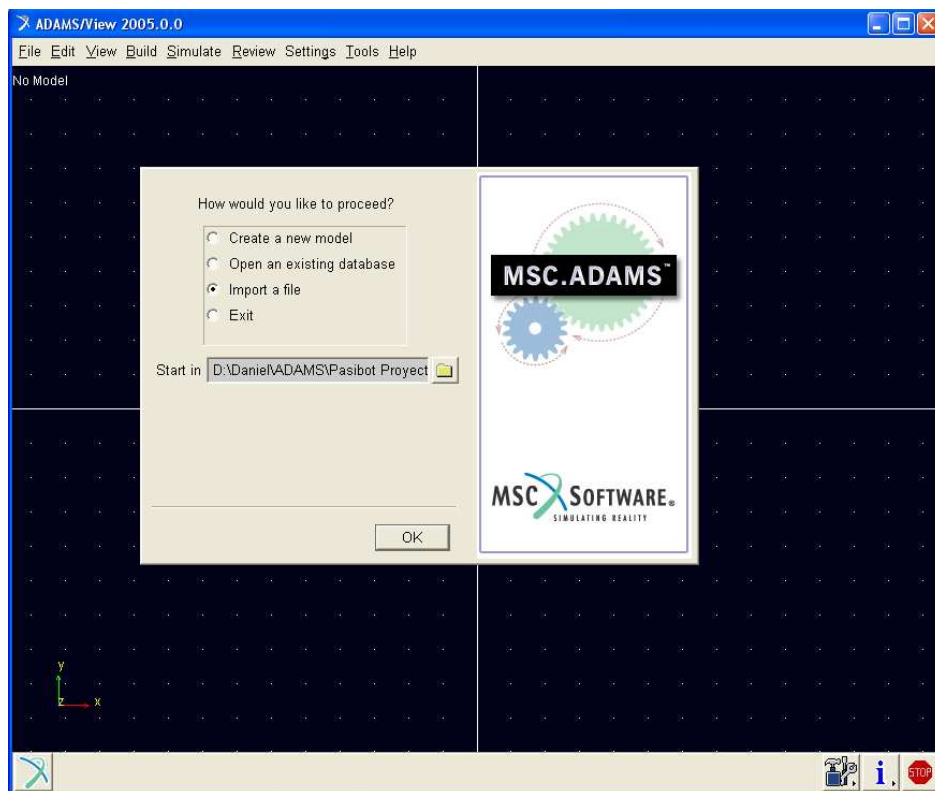


Figura 50: Ventana de importación de modelo.

Una vez se ha pinchado en “OK”, aparece la pantalla de la figura 51, en la que se podrá elegir el archivo de tipo Parasolid que nos interesa. Para ello, en “File type” se elegirá el tipo “Parasolid”; a continuación, en el cuadro de diálogo junto a “File to read” se pinchará con el botón derecho del ratón, apareciendo un menú desplegable, del que se hará click en “Browse”.

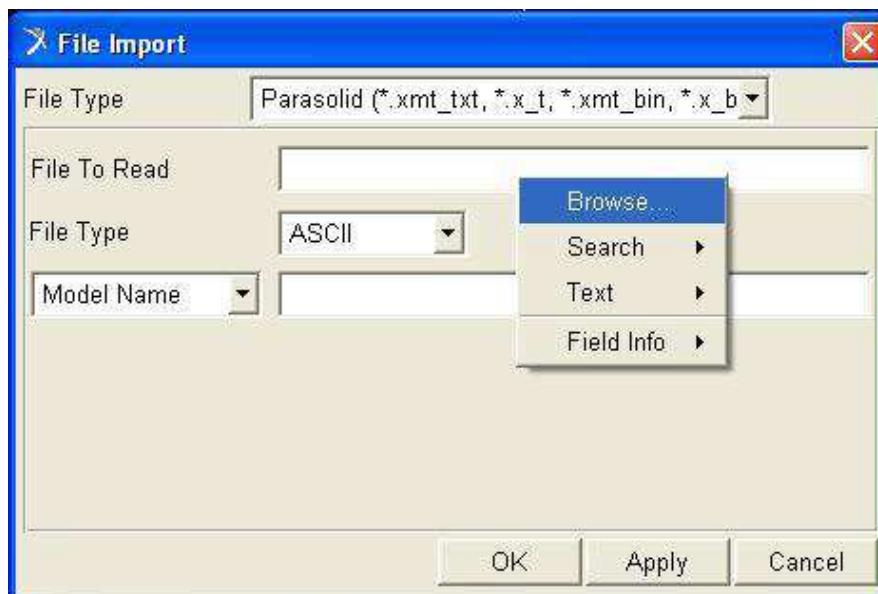


Figura 51: Pantalla de selección de archivo a importar.

Se buscará y seleccionará el archivo del MIMBOT, tras lo cual únicamente resta nombrarlo como se desee. Para ello, se hace click en el cuadro de diálogo junto a "Model Name", se elige "Create" y, en la siguiente ventana, se escribe el nombre deseado:

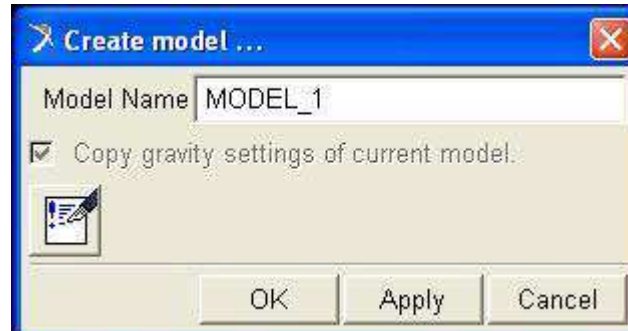


Figura 52: Ventana de nombre del modelo.

El programa no admite nombres que contengan espacios, por lo que, si se escriben varias palabras, será conveniente separarlas mediante guiones bajos.

Tras pulsar "OK" dos veces, se abrirá el modelo, que probablemente se encontrará en una posición no deseada, tal y como muestra la figura 53:

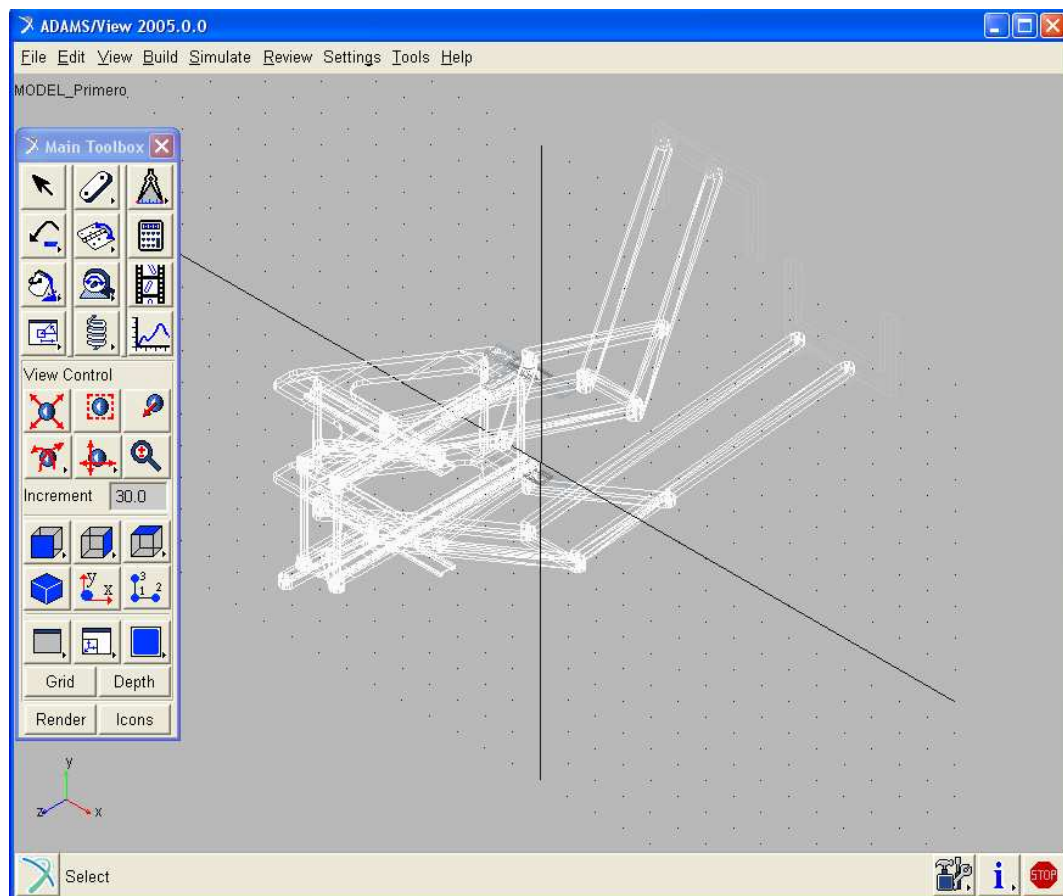


Figura 53: Modelo recién importado.

Esto se debe a que los ejes en los que se diseñó con Solid Edge no coinciden con los de MSC. Adams.

4.2.2. Posicionado del modelo.

En primer lugar, se reposicionará el MIMBOT, con el fin de que se sitúe más acorde con la malla de trabajo y los ejes que aparecen. Para hacer más cómodo el manejo del modelo, se recomienda renderizarlo (fig. 54) pulsando el botón **Render** de la barra de herramientas principal ("Main Toolbox"), tras lo cual se tendrá una mejor visión de él.

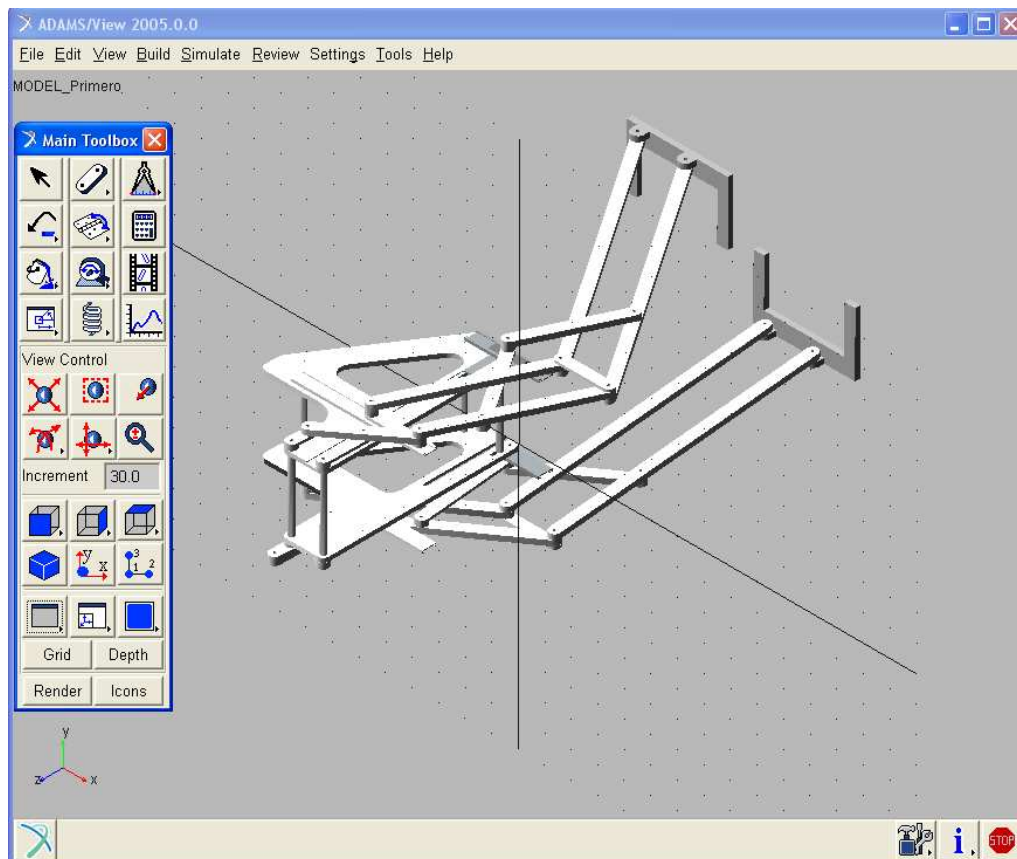




Figura 54: Modelo renderizado.

El siguiente paso es girar el modelo completo, y para ello se hará click en  y, mediante las flechas y eligiendo el ángulo, se podrá posicionar correctamente.

En mi caso, bastó con seleccionar la vista lateral, elegir un ángulo de 90° y pulsar la flecha . De este modo, el modelo queda de la siguiente forma:

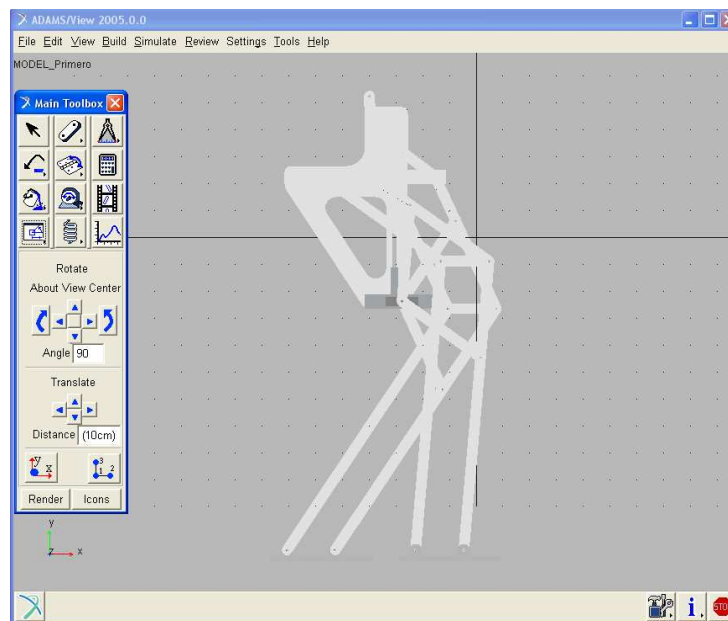


Figura 55: Modelo girado.

A continuación, se situará un punto significativo del MIMBOT en el centro de coordenadas de la malla de trabajo; se ha elegido el eje de rotación de la manivela izquierda. Para trasladar el modelo, se despliega con el botón derecho el menú de posición y se elige el icono de traslación



. Se marca el recuadro de la opción “Selected” y se selecciona, arrastrando el ratón, el modelo completo. Después, se hace click en el centro de rotación de la manivela y, a continuación, en el centro de coordenadas de la malla, con lo que el MIMBOT queda finalmente posicionado, tal y como se ve en la figura 56.

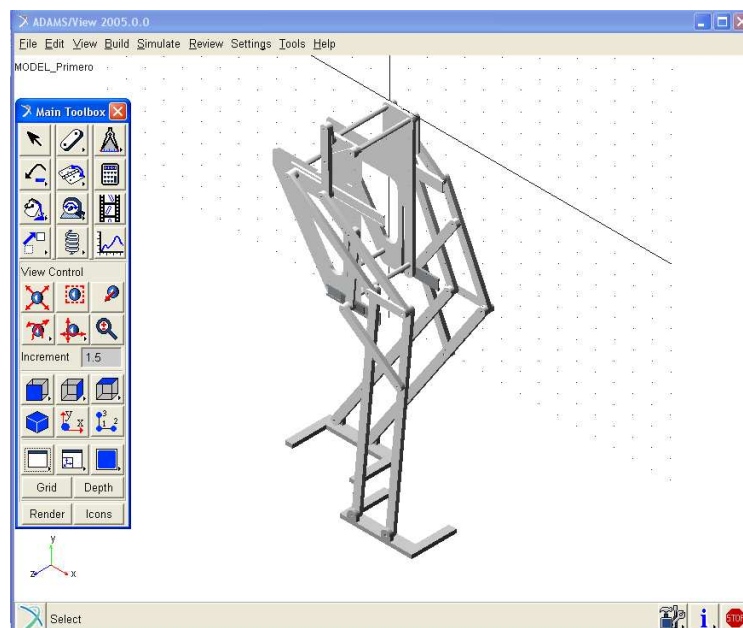


Figura 56: Modelo posicionado.

4.2.3. Asignación de nombres, propiedades y color.

Por defecto, el programa identifica a las distintas piezas que forman parte del modelo como PART_X, donde “X” es el número asignado a esa pieza. Será necesario, por tanto, ir asignando a todas y cada una de las piezas un nombre que facilite su diferenciación a posteriori, y un material para que cuando el programa efectúe las simulaciones tenga en cuenta sus propiedades.

Para ello, se procede de la siguiente manera: se pincha en el menú “Tools” de la parte superior de la ventana del programa y se selecciona “Database Navigator”. Aparecerá la ventana de la figura 57, en la que se eligen las opciones “Browse” y, más abajo, “Bodies”.

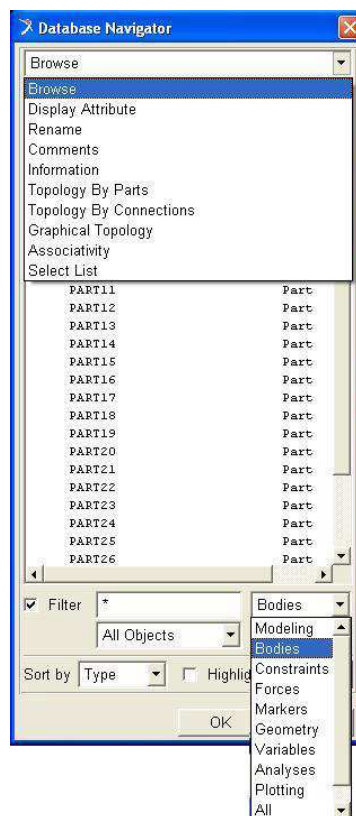


Figura 57: Database Navigator.

Tras ello, se irá pinchando en las piezas del modelo (“parts”) una por una, y en la ventana de Información que aparece se hace click en “Modify”, tras lo cual surgirá la ventana de modificación de la pieza (“Modify Body”) de la figura 58.

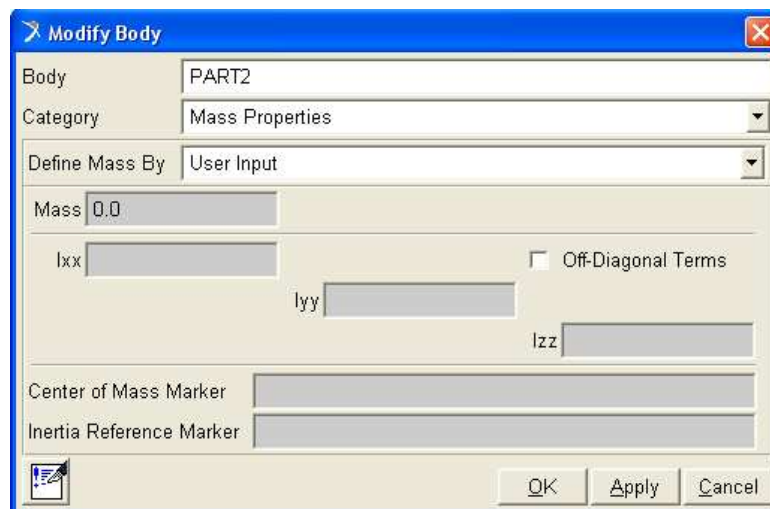


Figura 58: Modificación de la pieza.

Para cada una de las piezas, en el cuadro de diálogo junto a “Category” se elegirá “Name and position”, donde podremos modificar el nombre que el programa proporciona por defecto a la pieza, escribiéndolo en “New name” y pulsando “Apply” (fig. 59).



Figura 59: Cambio de nombre de la pieza.

Tras ello, se pincha en “Category> Mass properties”, en “Define Mass By” se elige “Geometry and Material Type” y en el cuadro de diálogo de “Material Type” haremos click con el botón derecho, seleccionando a continuación “Material> Guesses”, que nos ofrecerá elegir entre una serie de materiales cuyas propiedades tiene ya almacenadas el programa. En todos los casos, el material es el aluminio (“aluminium”).



Figure 1 is a 3D schematic diagram of a mechanical assembly, likely a prosthetic limb. The diagram shows various components and their dimensions in centimeters (cm). The components and dimensions are labeled as follows:

- MANIVELA_DCHA: 10.00 cm
- ANVILLO_DCHA: 10.00 cm
- CILINDRO_IZDO: 10.00 cm
- CA_DCHA: 10.00 cm
- VELA_IZDA: 10.00 cm
- BARRA_DCHA: 10.00 cm
- CILINDRO_DCHA: 10.00 cm
- CILINDRO_IZDO: 10.00 cm
- TENDON_SUPERIOR_DCHA: 10.00 cm
- TENDON_SUPERIOR_IZDO: 10.00 cm
- BARRA_DCHA: 10.00 cm
- CILINDRO_DCHA: 10.00 cm
- TENDON_INFERIOR_DCHA: 10.00 cm
- TENDON_INFERIOR_IZDO: 10.00 cm
- PERFORACION_DCHA: 10.00 cm
- PERFORACION_IZDO: 10.00 cm

Por último, se decidió cambiar el color de cada pieza mediante el menú “Appearance” seleccionable tras pinchar en cada sólido, con el fin de mejorar su visualización a la hora de observar las simulaciones y los vídeos. Las piezas homónimas y simétricas a izquierda y derecha se han coloreado de igual manera, como se ve en la figura 62.

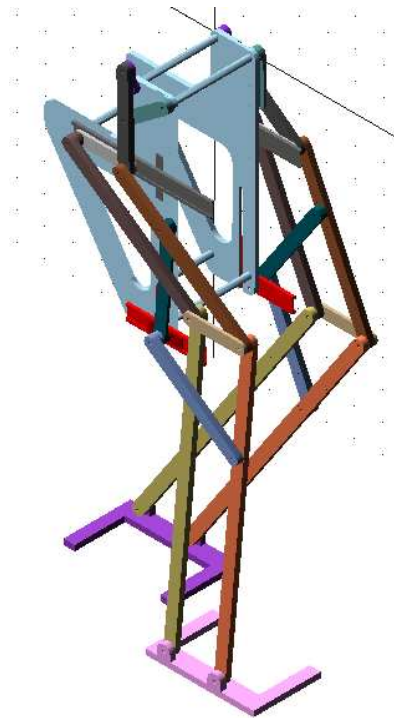


Figura 62: MIMBOT con color.

4.2.4. Implementación de juntas.


Aquí llegamos a una de las partes más delicadas del proceso de preparación del modelo, ya que se requiere una correcta implementación de las juntas entre piezas para establecer los movimientos que es capaz de efectuar cada pieza.

Las juntas que se han implementado entre las piezas del MIMBOT han sido de tres tipos: por una parte, las de rotación, para aquellas piezas que efectúan un movimiento de giro en torno a un eje; por otra, las traslacionales, que se aplicarán a piezas que deban desplazarse a lo largo de una trayectoria rectilínea; a estas dos se les une un tipo de junta, la de fijación, que se usará en momentos puntuales para anclar dos piezas entre sí, o bien una pieza en el espacio ("ground", en el interfaz del programa). Más adelante, los motores rotativos o lineales se instalarán sobre juntas ya existentes.



Figura 63: Menú de Juntas.

Se comenzará implementando las juntas de rotación sobre todos aquellos puntos en los que se articulan piezas que tienen libertad para girar en torno a un punto. Para ello, se seleccionará el

tipo de juntas de revolución  y se mantendrá la opción de dos cuerpos y una localización. De este modo, se pinchará en primer lugar sobre los dos cuerpos entre los que se va a establecer la junta, y posteriormente, en el punto (marcado con un círculo) que pertenece al eje del giro, apareciendo el icono mostrado en la figura 64.

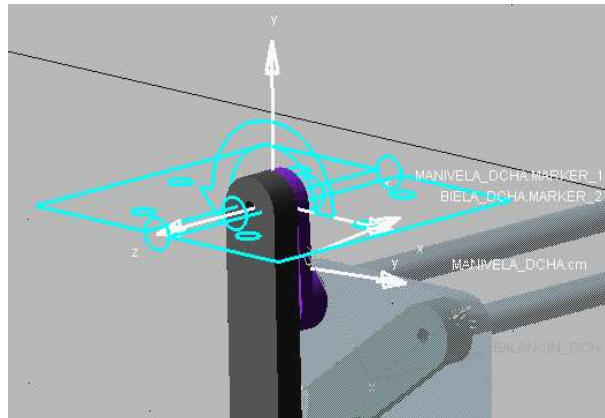


Figura 64: Junta de rotación entre biela y manivela.

Una vez establecidas todas las juntas de rotación, se procederá a implementar las de



traslación, representadas con el icono . En este caso, se tratará de un número menor de juntas, dado que únicamente tienen aplicación en lo que a las guías y deslizaderas se refiere. En total, se implementarán tres juntas traslacionales (fig. 65) en cada lateral de la cadera: una que mantenga el estabilizador en su trayectoria horizontal, otra para el movimiento rectilíneo vertical de la deslizadera que contiene al actuador, y otra para que éste se desplace horizontalmente. Para ello, se seleccionará el tipo de junta, se pinchará sobre la pieza que se desee y se volverá a hacer click cuando la flecha que aparece se encuentre en la dirección en la que se quiera que se produzca el movimiento.



Figura 65: Junta de traslación entre deslizadera y actuador.

En anteriores trabajos con el PASIBOT, se usó un tipo más de juntas, las denominadas “Point Curve”, que se aplicaban sobre tres esquinas de cada una de las deslizaderas para evitar que se salieran de su trayectoria. No obstante, en este Proyecto se decidió comprobar que esto se lograba de igual manera implementando únicamente las juntas traslacionales, algo que se verificó posteriormente al realizar las primeras simulaciones. Además, de este modo, se consigue evitar la engorrosa tarea de establecer todas las juntas “Point Curve”.

Por último, se implementará una junta de fijación (“Fixed” ) entre las manivelas izquierda y derecha. Esto se hace porque el motor rotativo se instalará sobre la manivela derecha, y se desea que el mismo movimiento se transmita también a la manivela izquierda. Para implementar la junta, se elige la de fijación, se hace click sobre ambas piezas y, finalmente, se pincha sobre cualquiera de los “markers” que se indican para dejar la junta establecida (fig. 66).

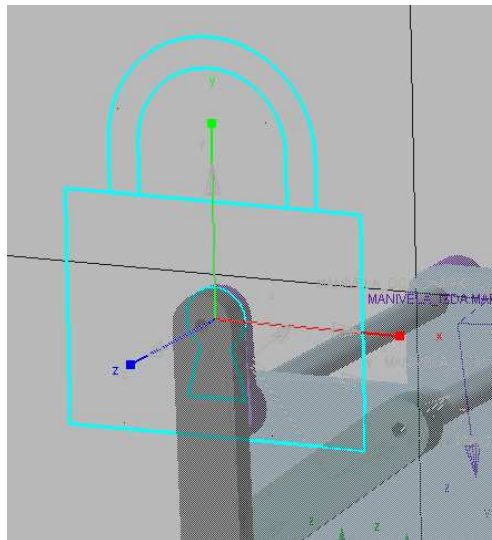


Figura 66: Junta de fijación entre las manivelas.

Con esto, quedan implementadas todas las juntas que son comunes a todas las simulaciones que se efectuarán con Adams. Según se estudie el modelo colgado o el modelo libre, se tendrán que establecer algunas juntas más, tal y como se explicará en el apartado correspondiente.

4.2.5. Implementación de motores.

Una vez establecidas todas las juntas, se procederá a implementar los motores donde corresponda. En primer lugar, se instalará un motor rotativo en la junta de rotación que relaciona la cadera con la manivela derecha (fig. 67).

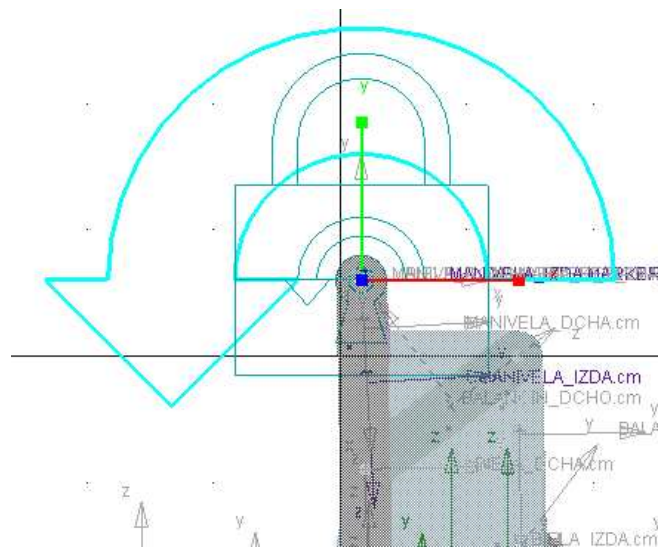


Figura 67: Motor rotativo en la manivela derecha.

Se aplicarán, además, dos motores lineales en cada lateral de la cadera: uno sobre la junta de traslación de la deslizadera en T y otro sobre la junta del actuador a lo largo de la deslizadera, representados en la figura 68.

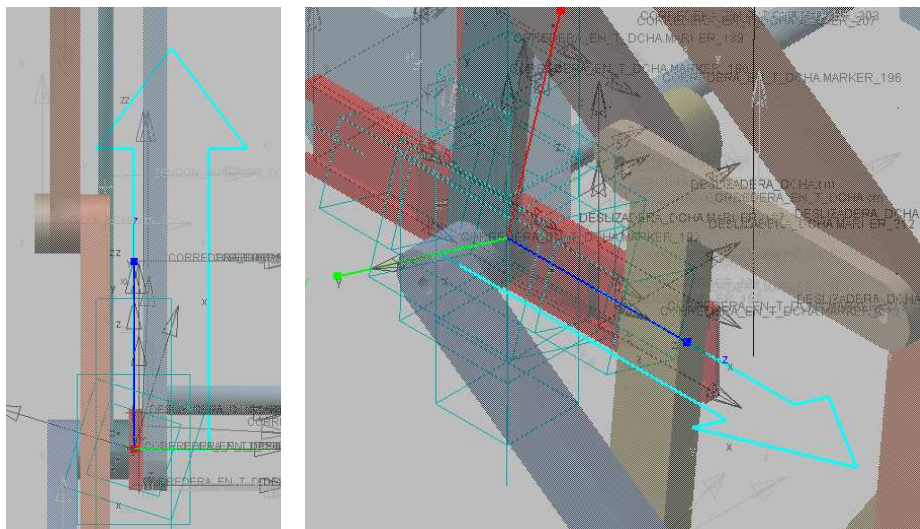


Figura 68: Motores lineales en deslizadera y actuador.

Los valores de la velocidad de los motores los asigna el programa por defecto, pero en este momento se recomienda dar valores nulos a todos ellos, es decir, mantener parados los motores.

Con la implementación de los motores se puede dar por concluida la fase de preparación del MIMBOT que es común a los dos casos que se van a estudiar (colgado y libre), resultando un modelo como el de la figura 69.



4.3. DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES.

Una vez se dispuso del modelo del MIMBOT con todas sus juntas y motores implementados, se procedió a realizar distintas simulaciones en MSC. Adams para comprobar que los actuadores tienen la capacidad de cumplir con los cometidos para los que fueron diseñados, en lo que conformó la última fase del Proyecto.

Se simuló el movimiento del MIMBOT en dos situaciones bien diferenciadas: en primer lugar, se situó el robot “colgado”, es decir, sin experimentar ningún tipo de interacción con su entorno físico, como si se mantuviera colgado de unos hilos que retienen la cadera en posición estática. Para ello, se ancló el modelo al espacio de trabajo y únicamente se estableció contacto entre los dos pies, con el fin de verificar que no colisionan entre ellos en ningún momento del paso del robot. Posteriormente, se efectuaron una serie de simulaciones con los actuadores tanto parados como en movimiento, combinando las trayectorias horizontales y verticales para demostrar que están preparados para recibir la implementación de funciones más concretas que permitan al robot hacer uso de distintas habilidades, como acortamiento y alargamiento de la zancada, elevación del paso y la combinación de ambos.

Evidentemente, al tratarse de un modelo colgado, el MIMBOT no sufre problemas de estabilidad, por lo que resulta ideal para observar sin interferencias el funcionamiento de los actuadores; no obstante, la ausencia de interacción física con el suelo y otros elementos hace que el comportamiento que muestra el robot en las simulaciones se aleje de lo que ocurriría realmente en las condiciones en las que un robot suele desarrollar su actividad.

Tras estudiar el modelo colgado, se quiso ir un paso más lejos y efectuar una serie de simulaciones de distinta naturaleza con el modelo libre, es decir, en contacto con el suelo y libre para avanzar sobre él. Por tanto, fue necesario establecer contacto entre el suelo y los pies del robot, además de entre ambos pies. Con el MIMBOT libre, se efectuaron distintas simulaciones: pruebas de estabilidad, movimiento con el inicio de paso cambiado, combinación de los actuadores y, por último, un pequeño ejercicio en el que el robot debía subir escalones ayudándose para ello de las nuevas habilidades adquiridas gracias a los actuadores.

En esta serie de pruebas se tuvo que afrontar un mayor número de inconvenientes, dado que el robot se vio afectado por la inestabilidad provocada por el contacto con el suelo, que se manifestó de distintas maneras, tal y como se detallará en los siguientes apartados.


4.4. MODELO COLGADO.

La utilidad de este modelo consistió, eminentemente, en poder comprobar que el movimiento de los actuadores implementados y, en general, del MIMBOT, era el esperado en condiciones ideales de entorno (sin interacción con suelo y otros objetos), y descartar así cualquier error que se pudiera haber cometido en las fases de diseño e implementación en Adams.

Creación de contactos.

Esta operación se realiza para poder descartar que exista cualquier tipo de colisión entre los pies del robot a lo largo de todo el recorrido de su paso. Para ello, se escoge en la barra de herramientas el menú de Contacto, que se encuentra en el menú desplegable de aplicación de



fuerzas sobre el modelo, representado por el icono . Al hacer click sobre él, se abre la ventana de la figura 70, con la que se podrá establecer el contacto entre pares de piezas.

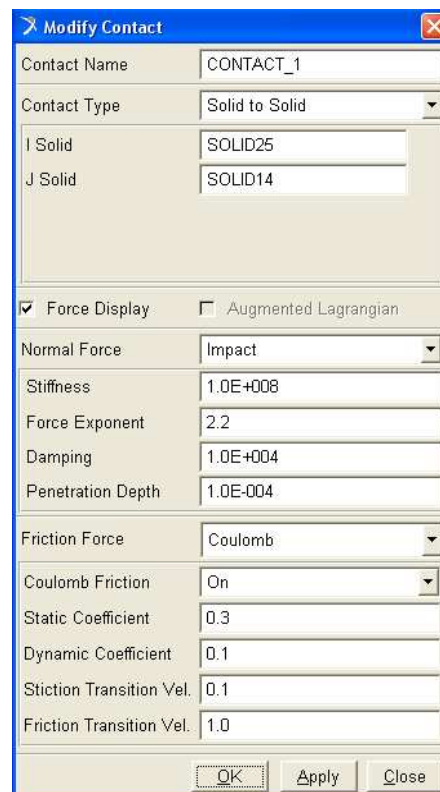


Figura 70: Menú de contacto.

En primer lugar, se hace click con el botón derecho en el cuadro de diálogo junto a “I solid”, se selecciona “Contact_Solid> Pick” y se pulsa sobre una de las dos piezas entre las cuales se quiere aplicar el contacto. A continuación, se escoge la misma opción para el cuadro de diálogo de “J solid” y se pincha sobre la segunda pieza. Los parámetros de la fuerza normal se dejan

por defecto y, en “Friction Force”, se selecciona Coulomb. En principio, también se mantienen los parámetros que aparecen por defecto, pero durante las simulaciones se podrán variar algunos como el del coeficiente estático.

Se elige “Apply” y se cierra la ventana, ya que no es necesario establecer ningún otro contacto. Es interesante mencionar que se intentaron llevar a cabo simulaciones estableciendo contactos entre todas las piezas, pero ello obligaba al programa a realizar un número mucho más elevado de cálculos, lo que repercutía en la duración de las simulaciones. Éstas llegaban a durar horas y resultaba inviable, por lo que se desechó este procedimiento.

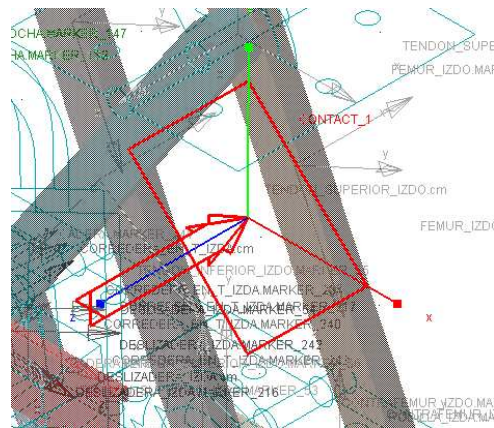


Figura 71: Contacto entre los pies.

Anclaje de la cadera.

Para recrear la situación del MIMBOT colgado en el aire, bastó con establecer una junta de fijación entre el espacio de trabajo (“ground”) y la cadera del modelo. Con ella, la cadera no experimentaría ningún movimiento, pudiéndonos centrar en el estudio de las trayectorias de las piernas.

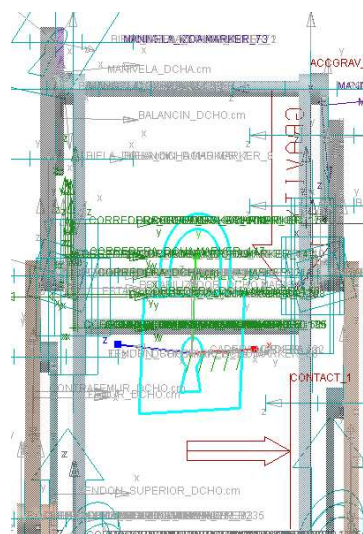


Figura 72: Junta de fijación de la cadera.

4.4.1. Actuadores parados.

La primera simulación que se llevó a cabo consistió en probar el movimiento manteniendo la velocidad de los motores de los actuadores y deslizaderas a cero. Con esto, se quería empezar comprobando que el modelo, como era previsible, funcionaba como los modelos anteriores, que es de hecho el estado en el que debería funcionar con un paso normal, si no se desea que esté desarrollando ninguna habilidad específica. A continuación, en la figura 73, se ofrecen una serie de imágenes de la simulación, en distintos momentos del paso del robot.

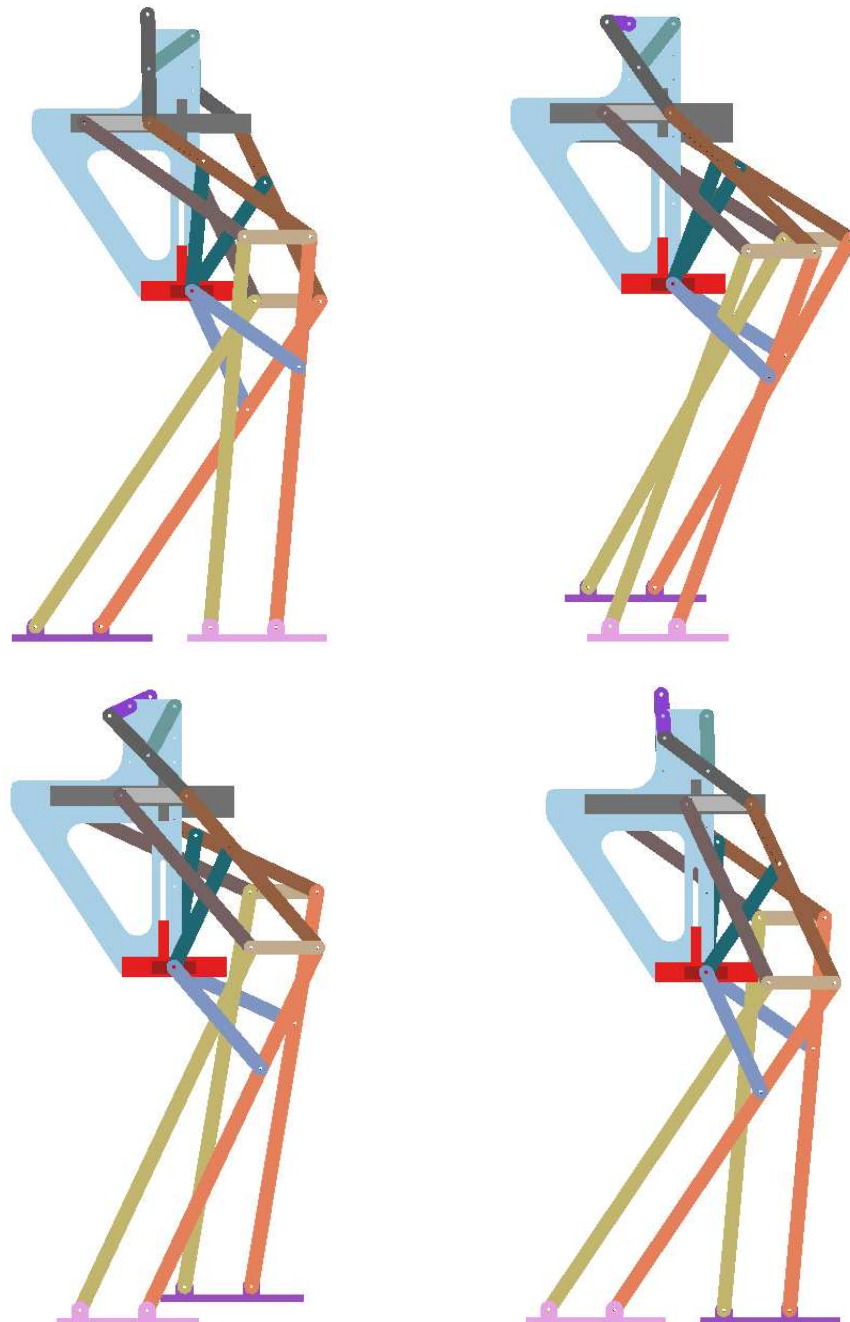


Figura 73: MIMBOT con actuadores parados.

En la figura 74, además, se puede apreciar cómo el estabilizador también se encuentra funcionando durante el transcurso del paso, ya que su deslizadera encuentra en una posición inferior a la de las anteriores imágenes, porque se ha desplazado hacia abajo a lo largo de la guía vertical de la cadera.

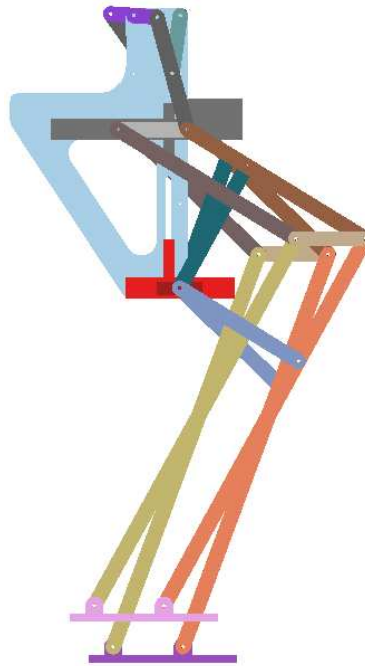


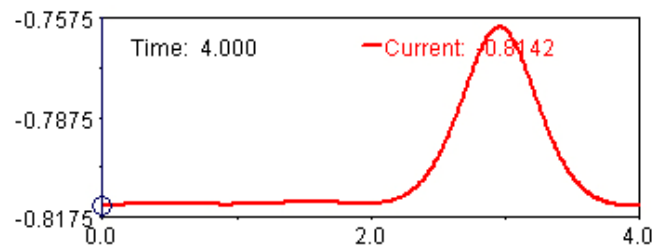
Figura 74: Estabilizador funcionando.

Para corroborar los resultados visuales mostrados en las figuras, se obtuvieron varias gráficas en las que se muestra la evolución de los desplazamientos y las velocidades de ciertos puntos a lo largo de la simulación.

Primeramente, se observó la evolución del punto en el que la tibia se une al pie derecho, como representativo de la posición del pie en cada momento.

La velocidad del motor rotativo para esta simulación fue de $90^\circ/\text{s}$, por lo que se efectuó una simulación de 4 s y 400 pasos, con el fin de observar el comportamiento a lo largo de un ciclo de movimiento completo.

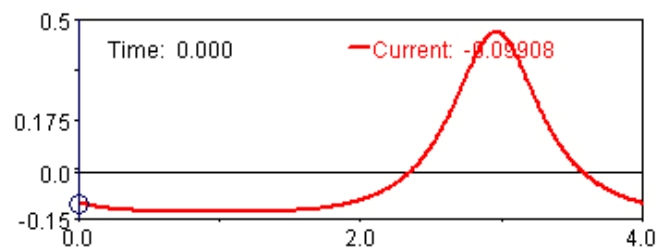
El desplazamiento del punto estudiado con respecto al eje Y se muestra en la gráfica 1.



Gráfica 1: Posición del pie respecto al eje Y.

Se comprueba cómo existe una primera zona llana que correspondería al apoyo del pie en el suelo, para posteriormente elevarse, llegar a su punto máximo y volver a descender hacia la posición de apoyo.

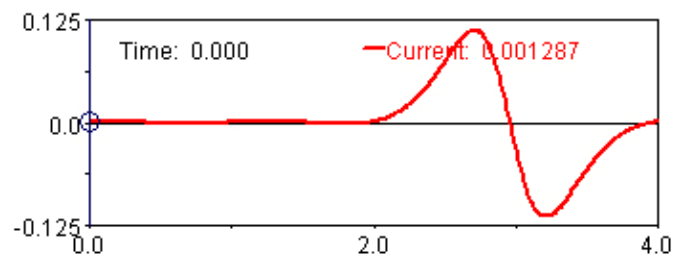
En cuanto a las gráficas de velocidad, la siguiente muestra la variación de la velocidad del pie en el eje X con respecto al tiempo:



Gráfica 2: Velocidad del pie respecto al eje X.

La velocidad se mantiene constante durante lo que sería el apoyo del pie, para ir elevándose a medida que efectúa la primera mitad de su vuelo y llegando al máximo en su posición más elevada, descendiendo de nuevo posteriormente mientras regresa a su posición de apoyo.

Lo mismo ocurre respecto al eje Y, las zonas de máxima velocidad se alcanzan a medio camino entre el despegue del pie y su posición más elevada, y a medio camino entre ésta y el aterrizaje del pie, como se observa en la gráfica 3.



Gráfica 3: Velocidad del pie respecto al eje Y.

Además, gracias al menú “Animation Controls” se puede comprobar cómo el estabilizador realiza su función de mantener recto el pie en la figura 75, en la que se trazan las trayectorias de los dos puntos donde se articula el pie:

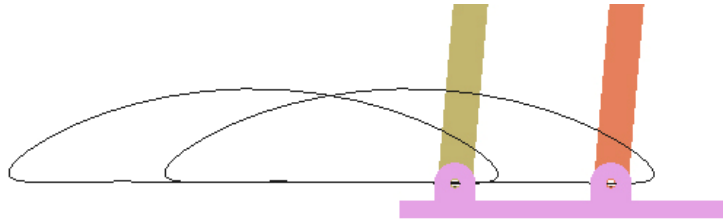


Figura 75: Trayectoria del pie a lo largo de un ciclo.

4.4.2. Actuadores con movimiento horizontal.

Para la siguiente simulación, se decidió comprobar el movimiento de los actuadores horizontales, que ofrecerían unas prestaciones similares a las del Proyecto [2], permitiendo al MIMBOT el alargamiento y acortamiento de la zancada de cualquiera de las dos piernas. Esta habilidad puede resultar útil para posicionar el robot frente a determinados objetos u obstáculos a la distancia deseada. También se considera una manera de conseguir que el MIMBOT trace trayectorias curvas, alargando la zancada que corresponda según se desee dirigir hacia la derecha o hacia la izquierda.

Para que los actuadores se desplazaran con la velocidad y la amplitud deseadas, se implementaron funciones de seno (SIN) de distintos valores en los motores lineales que controlan los actuadores. De esta manera, los actuadores realizan una trayectoria oscilante a lo largo de la deslizadera en T. Se puede conseguir que los motores se muevan únicamente en los intervalos deseados utilizando para ello funciones del tipo “IF”.

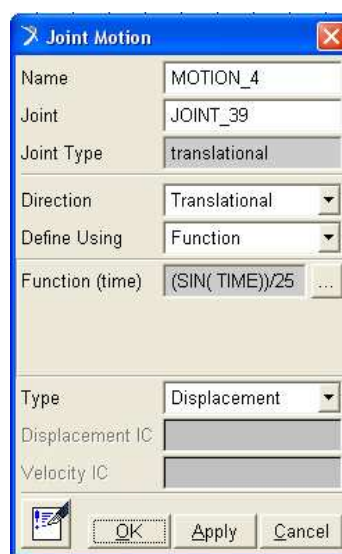


Figura 76: Función para el movimiento del actuador.

El alargamiento de la zancada se consigue cuando el actuador se mueve en dirección saliente del robot en el momento en el que el pie inicia el vuelo. Al tratarse de una función sinusoidal, el actuador se mueve en dirección opuesta mientras el pie se mantiene en contacto con el suelo, logrando también un alargamiento de la zancada por la parte posterior, antes de que el pie despegue. Por el contrario, si el actuador se mueve hacia la parte trasera del robot a la vez que el pie realiza su vuelo, la zancada se ve acortada.

En las siguientes series de imágenes (figs. 77, 78, 79 y 80) se pueden observar los nuevos comportamientos del pie, para acortamiento o alargamiento de zancada.

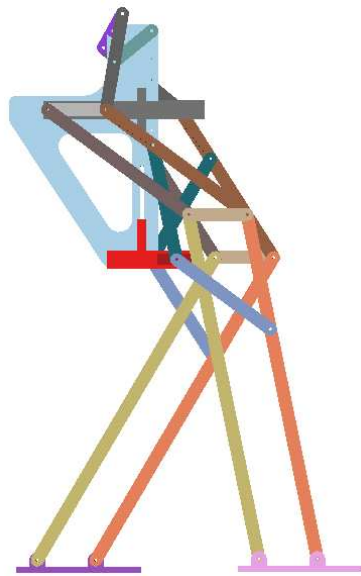


Figura 77: Alargamiento de la zancada delantera.

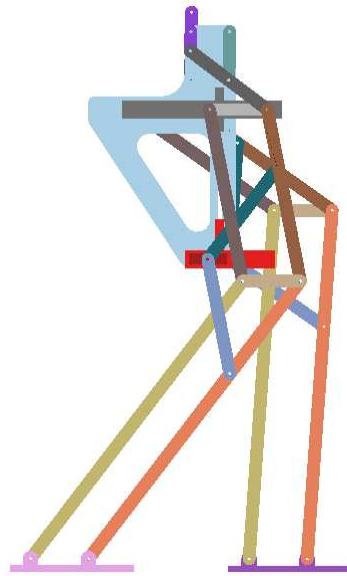


Figura 78: Alargamiento de la zancada posterior.

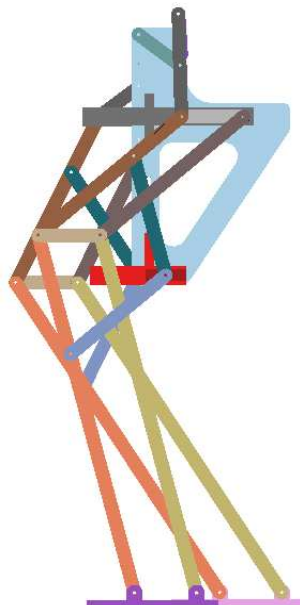


Figura 79: Acortamiento de la zancada trasera.

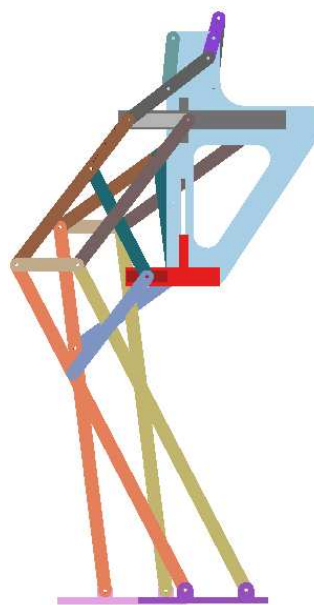


Figura 80: Acortamiento de la zancada delantera.

También se podría combinar el uso simultáneo de los dos actuadores horizontales, en caso de que se exigiera ese tipo de movimiento para alguna tarea del robot, como se ve en la figura 81.

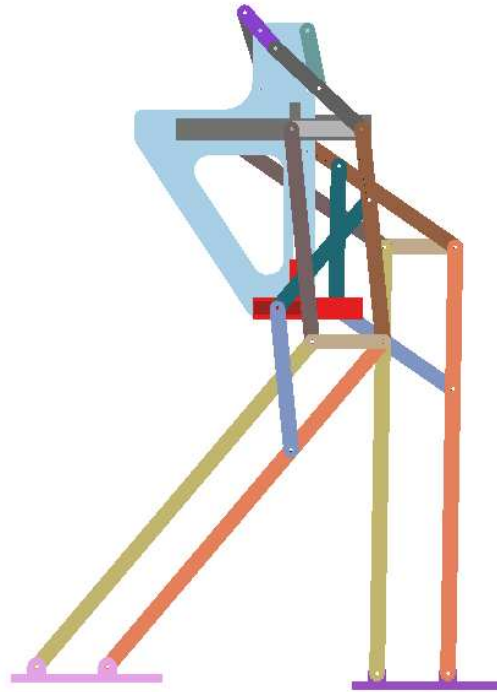


Figura 81: Actuadores funcionando simultáneamente.

Es importante mencionar que, a la hora de implementar las funciones que regulen el acortamiento o alargamiento de la zancada, se ha de poner especial cuidado en evitar que, debido al cambio de longitud del paso, alguno de los dos pies aterrice sobre el otro, provocando en esa situación importantes inestabilidades, en el caso de colisiones leves, y tropiezo y caída del robot, en el peor de los casos.

Todas estas simulaciones realizadas quisieron ser comprobadas mediante el trazado de gráficas que analizaran los desplazamientos del actuador horizontal y del pie. Cuando se quisieron obtener, se comprobó que las funciones sinusoidales daban ciertos problemas que dificultaban la interpretación de la gráfica. Fue por ello por lo que se implementaron, en su lugar, funciones lineales que, al igual que las sinusoidales, controlaran el desplazamiento del actuador a lo largo de la guía, haciéndolo regresar a su posición inicial después.

Las observaciones se realizaron en el actuador horizontal derecho y el punto de articulación del pie derecho con la tibia.

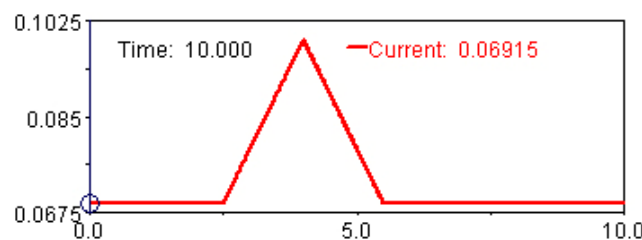
Alargamiento del paso con función lineal.

La velocidad del motor rotativo se estableció en $90^\circ/\text{s}$ y la simulación fue de 10 segundos (dos ciclos y medio de movimiento, para comparar con mayor facilidad el paso normal con el paso alargado) y 1000 pasos.

La función utilizada fue la siguiente:

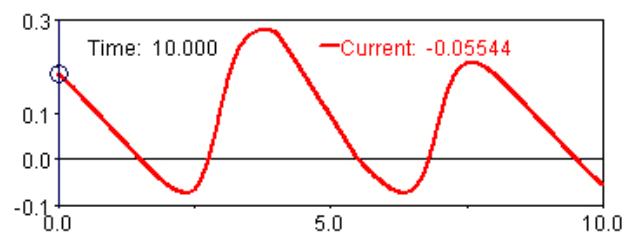
```
if(time-2.5:0,0,0.02*(time-2.5))-if(time-4:0,0,0.02*(time-4))  
-if(time-4:0,0,0.02*(time-4))-if(time-5.5:0,0,-0.02*(time-5.5))
```

La gráfica 4 muestra el desplazamiento lineal del actuador a lo largo del eje X; inicialmente está en reposo, se pone en marcha y llega en 1,5 s a la máxima amplitud que se ha establecido, para seguidamente volver a su posición inicial en el mismo intervalo de tiempo.



Gráfica 4: Posición actuador en eje X durante alargamiento del paso.

Por otra parte, en la gráfica 5 se puede observar cómo durante el primer paso, el alargado, el desplazamiento del pie es mayor, mientras que el paso, el normal, tiene un menor desplazamiento.



Gráfica 5: Posición pie en eje X durante alargamiento del paso.

Indudablemente, también resulta de mucha utilidad la trazada del punto de articulación del pie durante un paso normal en comparación con la trazada durante el alargamiento del paso (fig. 82).

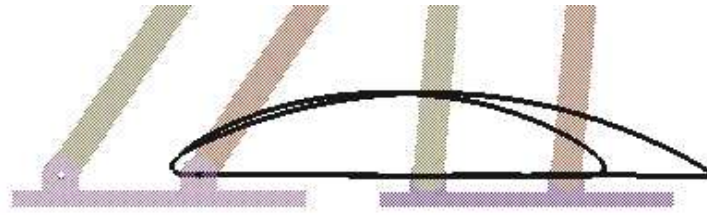


Figura 82: Comparación entre paso normal y alargamiento de paso.

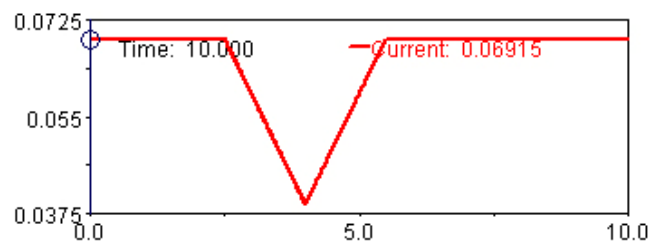
Acortamiento del paso con función lineal.

Los parámetros de la simulación son los mismos que en el caso anterior.

En este caso, la función es la opuesta que la anterior, ya que se desea que el actuador se desplace en sentido opuesto:

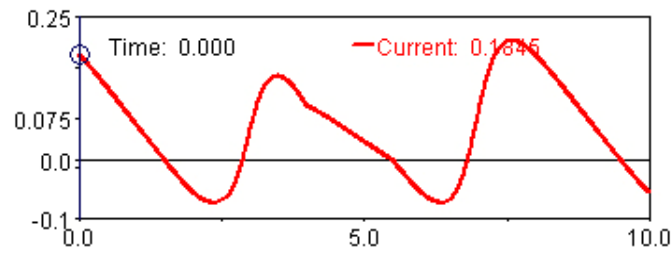
```
if(time-2.5:0,0,-0.02*(time-2.5))-if(time-4:0,0,-0.02*(time-4))  
-if(time-4:0,0,-0.02*(time-4))-if(time-5.5:0,0,0.02*(time-5.5))
```

La gráfica del desplazamiento del actuador resulta similar a la del alargamiento, aunque en sentido opuesto, al desplazarse inicialmente en el sentido negativo del eje X.



Gráfica 6: Posición actuador en eje X durante acortamiento del paso.

En cuanto al desplazamiento del pie, en la gráfica 7 se observa cómo la primera zancada, durante la que funciona el actuador, es la de menor amplitud, mientras que la segunda recupera su desplazamiento habitual. El leve suavizamiento en la pendiente corresponde al lapso durante el cual el actuador está recuperando su posición inicial desplazándose en el sentido positivo del eje X, que aminora la marcha del pie derecho durante su apoyo.



Gráfica 7: Posición pie en eje X durante acortamiento del paso.

Finalmente, en la figura 83 se presenta visualmente la comparación entre las trayectorias del pie durante el paso acortado y durante el paso normal.



Figura 83: Comparación entre paso normal y acortamiento de paso.

4.4.3. Actuadores con movimiento vertical.

En esta ocasión, se procedió a comprobar el movimiento vertical de los actuadores, que se produce por el desplazamiento de la deslizadera en T a lo largo de la guía de la cadera.

Este movimiento, implementado también mediante funciones sinusoidales o lineales, permite a las piernas elevar o bajar el paso, lo que resulta necesario para subir o bajar escalones de una altura normal, o bien sortear obstáculos.

A continuación, se muestran series de imágenes (figs. 84 y 85) en las que se compara el paso normal del robot con el paso en caso de que los actuadores se desplacen verticalmente.

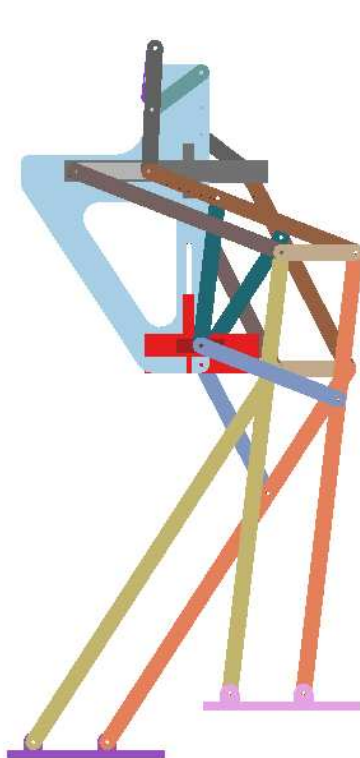


Figura 84: Actuador vertical subiendo el paso.

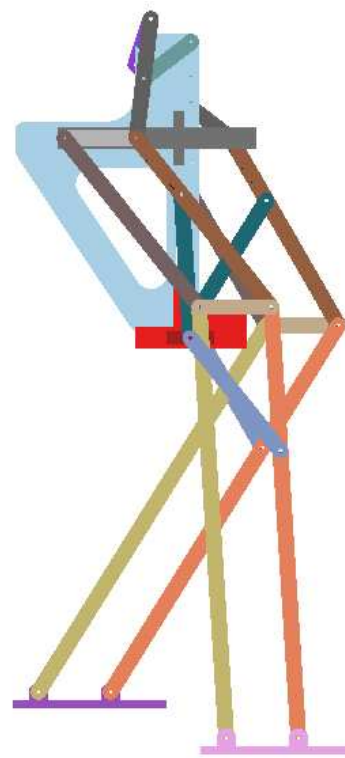


Figura 85: Actuador vertical bajando el paso.

Como en el caso anterior, se verificó el funcionamiento simultáneo de los actuadores, tanto elevando como bajando el paso de las piernas, para condiciones de terreno más hostiles para el MIMBOT que requirieran de una mayor movilidad.

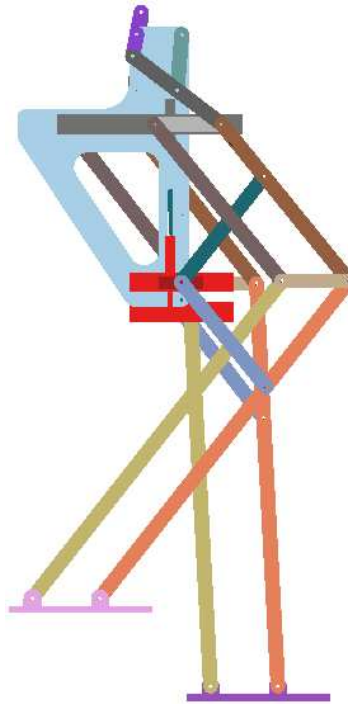


Figura 86: Actuadores subiendo y bajando el paso.

Al igual que en el caso de los actuadores horizontales, estas simulaciones también arrojaron diversas gráficas en las que se pueden observar los desplazamientos del actuador tras implementar la función de su movimiento y la variación de la trayectoria del pie.

Las observaciones se realizaron en el actuador horizontal derecho y el punto de articulación del pie derecho con la tibia.

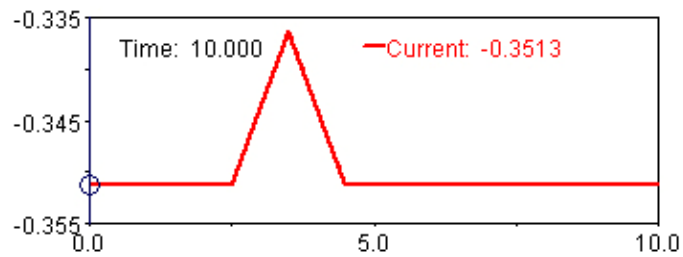
Elevación del paso con función lineal.

Los parámetros de la simulación fueron de 10 s (dos ciclos y medio) y 1000 pasos.

La función implementada fue la siguiente:

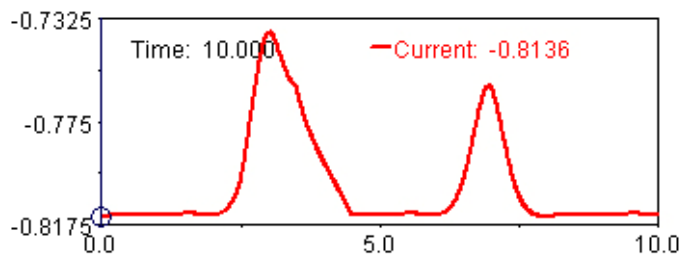
```
if(time-2.5:0,0,0.015*(time-2.5))-if(time-3.5:0,0,0.015*(time-3.5))  
-if(time-3.5:0,0,0.015*(time-3.5))-if(time-4.5:0,0,-0.015*(time-4.5))
```

La gráfica 8 muestra el desplazamiento lineal del actuador a lo largo del eje Y; inicialmente está en reposo, se pone en marcha y llega en 1 s a la máxima amplitud que se ha establecido, para seguidamente volver a su posición inicial en el mismo intervalo de tiempo.



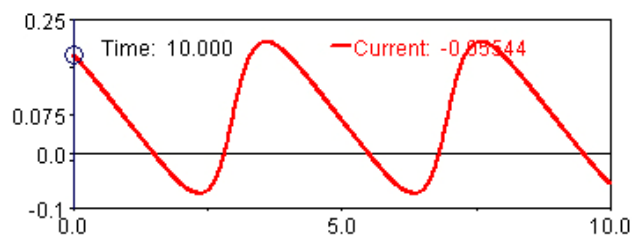
Gráfica 8: Posición actuador en eje Y durante elevación del paso.

En cuanto a los desplazamientos del pie, en la gráfica 9 se comprueba cómo la primera zancada, la actuada, alcanza mayor altura que la segunda, durante la cual ya no interviene el actuador.



Gráfica 9: Posición pie en eje Y durante elevación del paso.

Para completar el análisis gráfico, se puede comprobar también cómo la elevación del paso no afecta para nada a la distancia que el pie recorre a lo largo del eje X, tal y como se observa en la gráfica 10, en la que todos los picos de la curva se encuentran a la misma altura.



Gráfica 10: Posición pie en eje X durante elevación del paso.

Por último, en la figura 87 se presenta la comparación entre la trayectoria del pie durante la actuación y la trayectoria del paso normal.

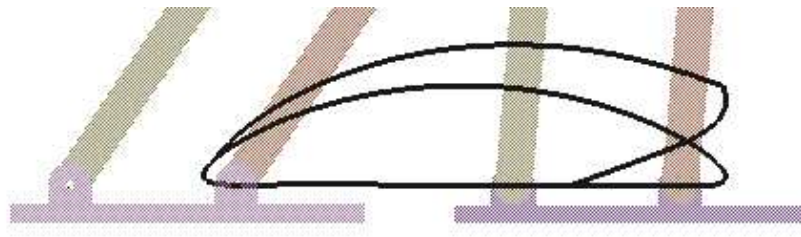


Figura 87: Comparación entre paso normal y elevación de paso.

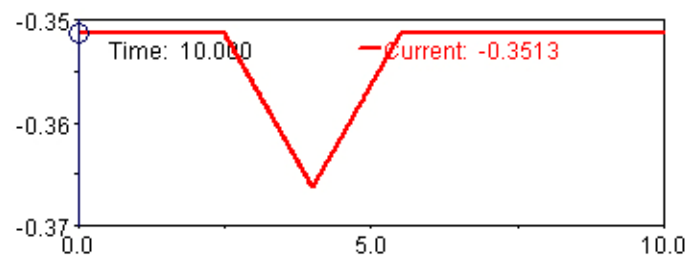
Descenso del paso con función lineal.

Los parámetros de la simulación fueron de 10 s (dos ciclos y medio) y 1000 pasos, como viene siendo habitual.

Para provocar el descenso del actuador, la función implementada fue la siguiente:

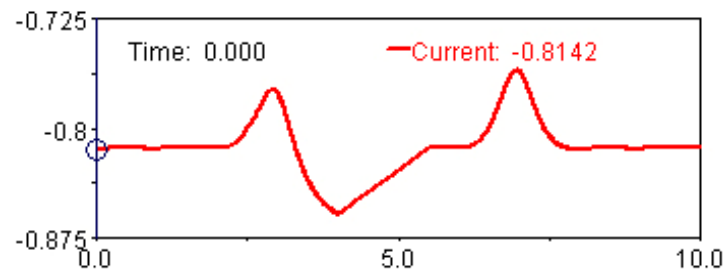
```
if(time-2.5:0,0,-0.01*(time-2.5))-if(time-4:0,0,-0.01*(time-4))  
-if(time-4:0,0,-0.01*(time-4))-if(time-5.5:0,0,0.01*(time-5.5))
```

El desplazamiento lineal del actuador a lo largo del eje Y es similar al de la elevación del paso, pero en sentido opuesto, dado que esta vez el actuador desciende:



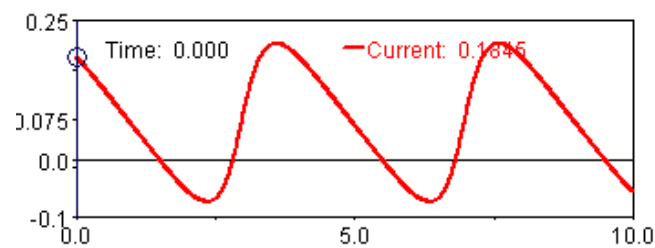
Gráfica 11: Posición actuador en eje Y durante descenso del paso.

La gráfica 12, que enfrenta la posición del pie en el eje Y respecto al tiempo, refleja, en el primer pico, la altura que alcanza el pie derecho mientras ha empezado a funcionar el actuador, y por eso esta altura es menor que la del segundo pico, que corresponde a un paso normal. Además, el pico inferior representa la altura a la que baja el pie gracias al actuador; posteriormente, la pendiente ascendente refleja el ascenso del actuador para recuperar su posición inicial.



Gráfica 12: Posición pie en eje Y durante descenso del paso.

También resulta de interés comprobar cómo, al igual que en la elevación del paso, la longitud de la zancada en el eje X no se ve afectada por el descenso del pie.



Gráfica 13: Posición pie en eje X durante descenso del paso.

La comparación entre las trazadas del punto del pie estudiado mientras funciona el actuador y cuando éste se encuentra parado vuelve a resultar muy clarificadora respecto a la trayectoria que el pie efectúa (fig. 88).

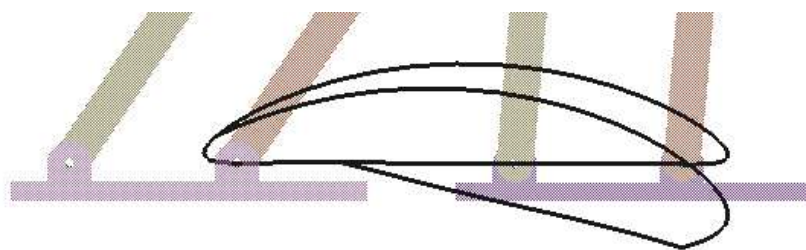


Figura 88: Comparación entre paso normal y descenso de paso.

4.4.4. Combinación de movimientos horizontal y vertical.

Una vez comprobado que los actuadores funcionan correctamente tanto en vertical como en horizontal, es de suponer que no existirá ningún problema con ambas funciones implementadas simultáneamente.

Esto permitiría al MIMBOT efectuar pasos en situaciones que presenten alguna dificultad, como por ejemplo subiendo un escalón a la vez que acorta la zancada para no chocar con el escalón siguiente. No obstante, en un caso real esta implementación debería realizarse con sumo cuidado, pues, si ya resulta delicada la implementación en el caso de que únicamente existan movimientos horizontales o verticales del actuador, al combinar ambos se multiplican las probabilidades de que se produzcan colisiones o inestabilidades en el modelo.

Para corroborarlo, se realizaron simulaciones combinando ambos movimientos de forma más o menos aleatoria. A continuación, se muestran imágenes de distintos momentos de dichas simulaciones.

En la figura 89, el paso de la pierna derecha se ve, por una parte, acortado, mientras que verticalmente se eleva; de este modo se podría, por ejemplo, subir un escalón a la vez que se acorta el paso para evitar que el pie realice demasiado vuelo una vez se encuentra situado sobre el escalón.

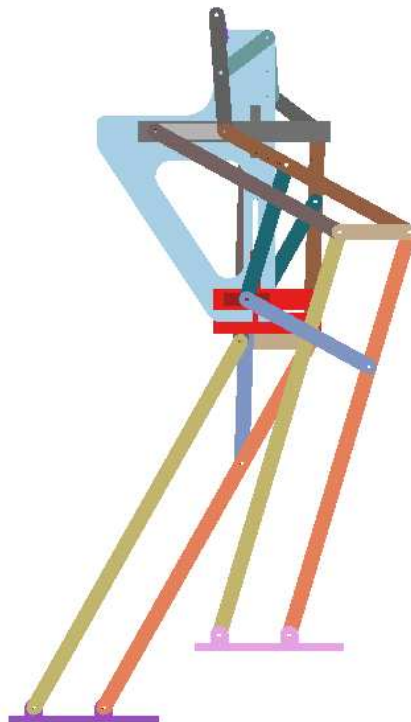


Figura 89: Acortamiento y elevación de la zancada.

En esta ocasión, no resulta de interés mostrar las gráficas de los desplazamientos de actuador y pie, dado que, al haberse realizado las simulaciones con las mismas funciones que en cada uno de los casos individuales de acortamiento del paso y elevación del paso, las gráficas resultantes son el conjunto de las mismas que ya se presentaron en cada apartado para el eje X y el eje Y.

Sí se muestra en la figura 90 la comparación entre la trayectoria del pie durante un paso normal y la que efectúa mientras funcionan los actuadores.



Figura 90: Comparación entre paso normal y acortamiento más elevación del paso.

Se comprueba cómo la curva trazada por el paso actuado no alcanza el desplazamiento en el eje X del paso normal y, además, se eleva por encima del punto máximo del paso normal en el eje Y.

Por su parte, en el modelo de la figura 91, el pie derecho ve alargada su zancada, a la vez que desciende la deslizadera. Ésta podría ser la actuación en el momento de descender un escalón. También se puede observar cómo el actuador de la pierna izquierda asciende, para permitir al robot poder sortear con mayor facilidad la altura a salvar.

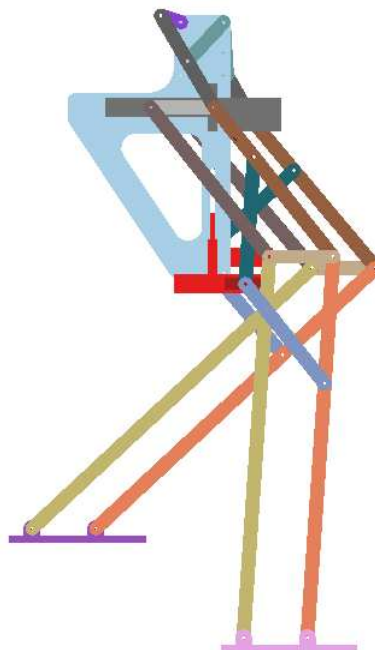


Figura 91: Alargamiento y descenso de la zancada.

En este caso, también se puede observar claramente en la figura 92 la trayectoria del pie actuado: su trazada tiene más longitud sobre el eje X y, además, desciende por debajo del nivel del paso normal.

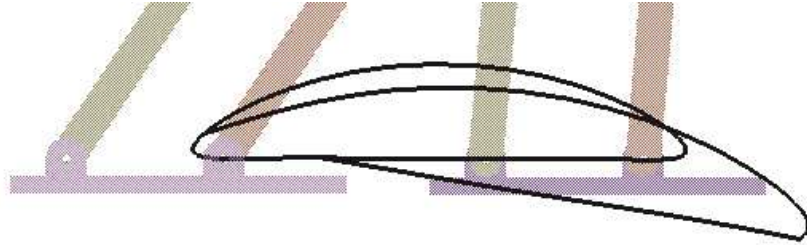


Figura 92: Comparación entre paso normal y alargamiento más descenso del paso.

4.5. MODELO LIBRE.

Una vez realizadas las simulaciones con el modelo colgado, es el momento de comprobar su movimiento si se posa sobre el suelo (fig. 93), para poder analizar cómo varía su comportamiento respecto al modelo colgado y observar los problemas que puedan aparecer debido a la interacción física del MIMBOT con el suelo y otros elementos.

Los pasos que se van a seguir a lo largo de este apartado se resumen en los siguientes puntos:

- Creación de un suelo y aplicación de contacto entre él y el MIMBOT.
- Realización de pruebas de estabilidad con el robot en reposo.
- Implementación de los actuadores.
- Ejercicio de subida de escalones.

Como se verá más adelante, la fase de implementación de los actuadores contó con una serie de simulaciones que inicialmente no estaban previstas, que consistieron en probar el mismo modelo pero con el inicio del paso cambiado y que serán justificadas en el apartado que corresponde.

Esta fase del Proyecto es en la que el modelo más claramente se presta para la experimentación con distintas simulaciones, ya que la inclusión de contactos físicos y la variedad de condiciones a las que se somete el robot amplían el abanico de comportamientos que éste puede mostrar, sobre los cuales se podrá influir de muchas maneras distintas.

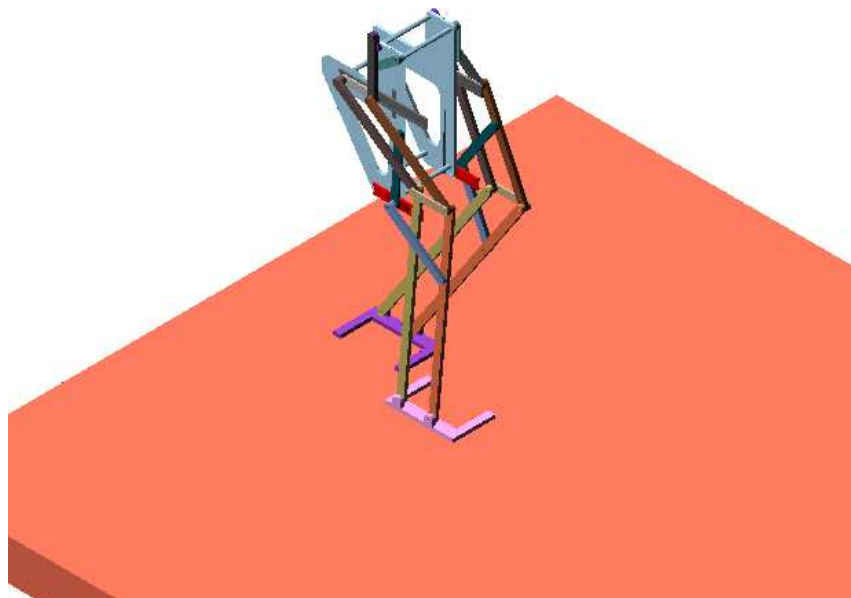



Figura 93: Modelo libre.

Creación del suelo y juntas.

Primeramente, se debió crear un suelo para el robot que sea lo suficientemente extenso como para que se puedan realizar todas las pruebas deseadas sobre él.

La pieza del suelo se puede crear desde la barra de tareas de diseño de Adams mediante dos procedimientos: o bien como extrusión, o bien de la manera en la que se realizó en este caso,

con el comando “BOX”, que se representa como . Este comando crea un paralelepípedo a partir de un perfil rectangular que se traza sobre la malla de trabajo.

La creación del suelo siguió los siguientes pasos: en primer lugar, se trazó un perfil rectangular de la longitud deseada, de forma que su vértice superior izquierdo coincidiera con la esquina inferior delantera del pie más adelantado, de modo que no se produjeran interferencias y que no hubiera que modificar la altura a la que se sitúa el suelo (fig. 94).

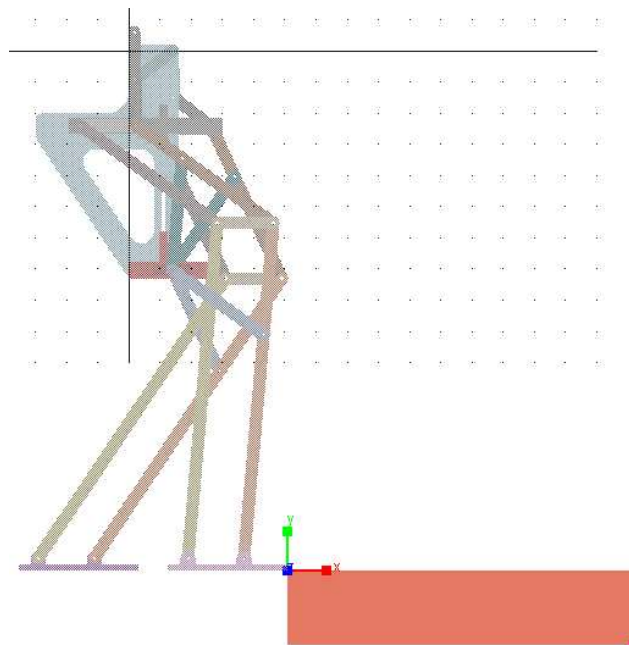


Figura 94: Creación del perfil rectangular.

Después, se proporcionó la anchura deseada al suelo. Para ello, hay que entrar en el menú “Settings> Working Grid” y desactivar la casilla “Show Working Grid”. Después, se selecciona la vista cenital del modelo y se pincha en la esquina del suelo desde la cual se quiera agrandar hasta el tamaño deseado. Finalmente, mediante los comandos de la barra de posición se sitúa el suelo de en la posición que convenga (fig. 95).

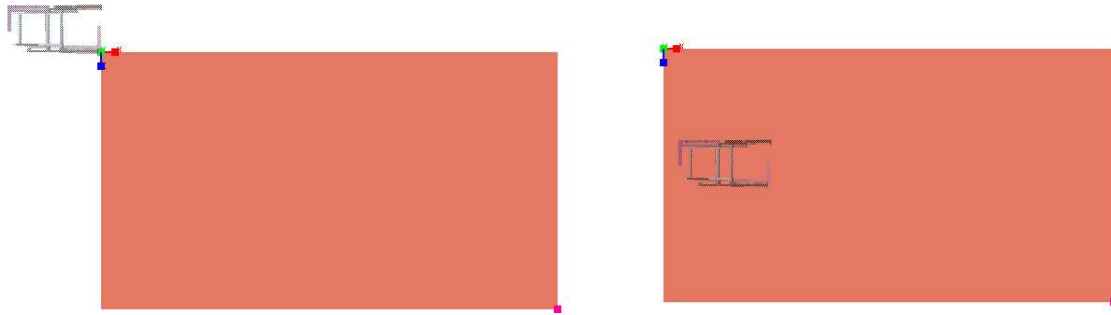


Figura 95: Redimensionamiento y posicionamiento del suelo.

En cuanto a las juntas, dado que en el paso siguiente se aplicó aceleración de la gravedad al modelo, se tuvo que establecer una junta de fijación entre el suelo y el espacio de trabajo, para que se mantuviera fijo y no cayera. Esta operación se realizó tras asegurarse de que el suelo no iba a modificar su posición más, dado que, una vez establecidas las juntas, si el objeto se mueve, estas juntas han de ser aplicadas de nuevo para que la simulación las reconozca. Es importante recordar, dado que lo usual es que se parta del modelo colgado, que en esta ocasión no existe la junta de fijación entre la cadera y el espacio de trabajo, ya que obviamente ahora se requiere que el MIMBOT se mueva libremente y sin restricciones.

Creación de contactos y gravedad.

En esta ocasión, el MIMBOT debe reconocer la presencia de un suelo para que las simulaciones se puedan llevar a cabo correctamente. Por ello, se procedió a implementar los contactos entre los pies y el suelo. Se aplicaron de la misma forma en que se explicó para el contacto entre pies, es decir, seleccionando primero un pie y el suelo, creando el contacto, y posteriormente efectuando la misma operación para el segundo pie. También esta vez se aplicaron los parámetros de la Fuerza de Fricción de Coulomb.

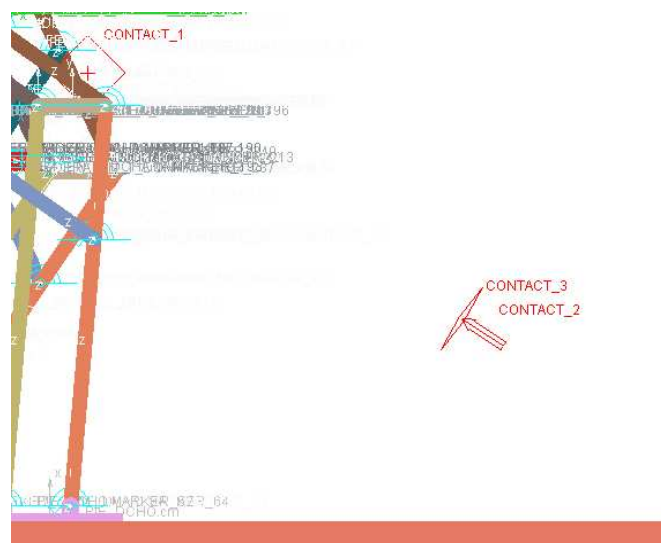



Figura 96: Contactos entre pies y suelo.

Al igual que en el caso del MIMBOT colgado, se estableció además contacto entre ambos pies, para detectar las colisiones que se produzcan entre ellos, si las hubiera.

Un elemento importante entra en juego en este caso es la aceleración de la gravedad, ya que el MIMBOT ahora se ve sometido a sus efectos. Para su aplicación, en el menú de fuerzas de la barra de tareas se

selecciona el icono , que crea automáticamente el vector de la aceleración de la gravedad. Para modificar su valor y dirección, se selecciona “Gravity” en el menú “Settings” y se especifica un valor de -9,81 en la dirección del eje Y.

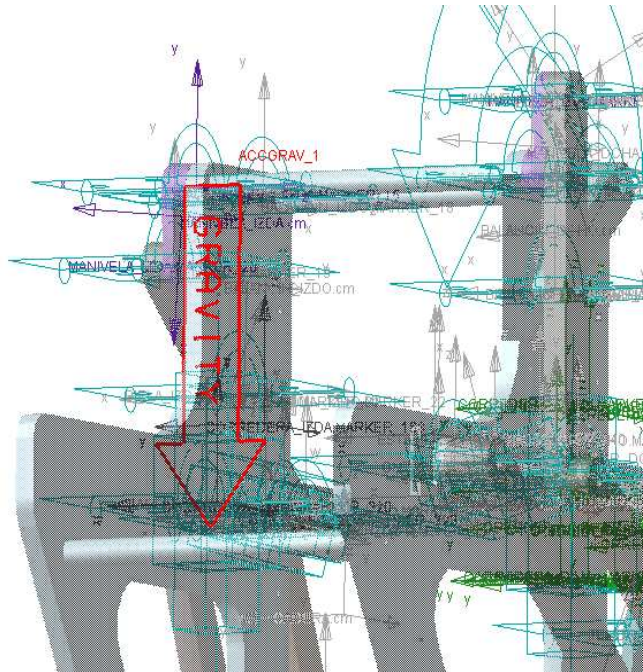


Figura 97: Aceleración de la gravedad.

Con esto, los pasos previos a las simulaciones con el MIMBOT se dan por concluidos, obteniendo un modelo como el de la figura 98.

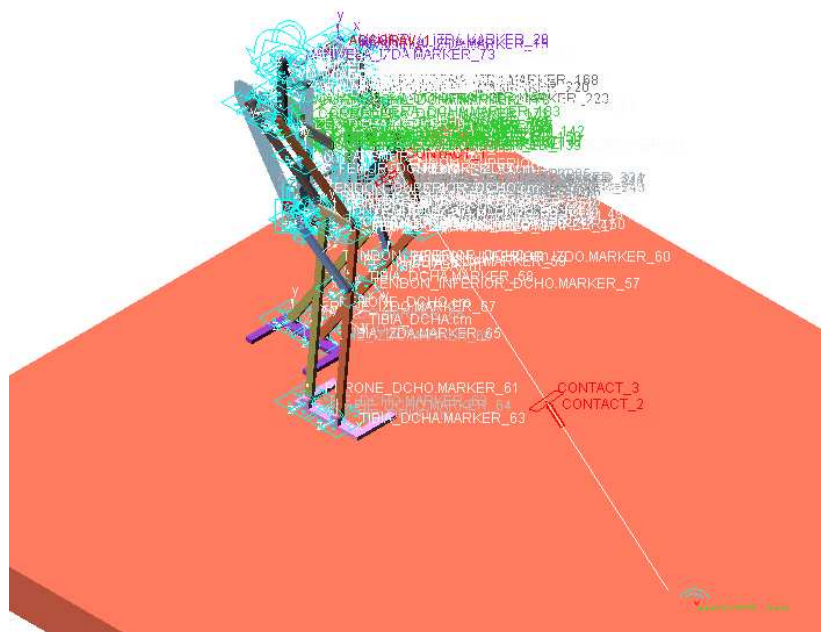


Figura 98: Modelo con suelo.

4.5.1. Pruebas de estabilidad.

Antes de proporcionar movimiento al robot, se realizaron varias pruebas de estabilidad del robot estático. Debido a posibles inexactitudes casi imperceptibles en el posicionamiento del modelo en Adams, cuando se inicia la simulación con el robot estático transcurre un lapso de tiempo en el cual el modelo sufre pequeños desplazamientos o balanceos, antes de quedar completamente quieto.

Es importante que el movimiento del motor rotativo del MIMBOT se inicie una vez ha llegado dicho momento, ya que, de otro modo, esas ligeras oscilaciones pueden influir de forma negativa sobre el equilibrio del robot cuando éste inicia su paso, provocando inestabilidades.

Se realizaron, pues, tres pruebas de estabilidad: la primera, a 0 mm del suelo, es decir, con el robot completamente apoyado en él; la segunda, situando la planta de los pies a 5 mm del suelo y dejando caer el robot al comienzo de la simulación; por último, se posicionó el robot 8 cm (80 mm) sobre la superficie del suelo, y nuevamente se dejó caer.

Para situar el suelo en los dos últimos casos, bastó con moverlo mediante las flechas de traslación de la barra de posición, especificando la distancia que correspondiera.

- **Altura de 0 mm.**

Se efectuó una primera simulación con el suelo en la posición en la que fue creado, es decir, teóricamente con toda la superficie de la planta de los pies en contacto con él. Como se observa en la figura 99, este contacto no llega a ser pleno en el caso de uno de los pies, debido a las pequeñísimas inexactitudes explicadas antes.

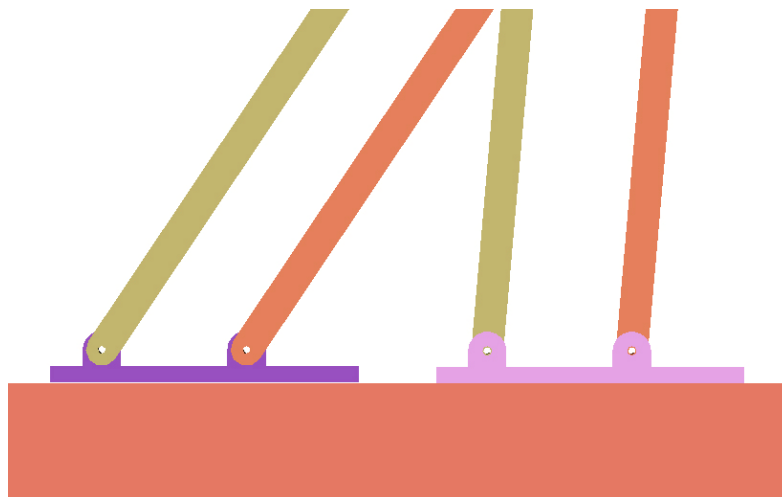


Figura 99: Prueba a 0 mm.

Tras correr una simulación de varios segundos, se eligió el punto de la cadera donde se sitúa su c.d.m. para medir los desplazamientos que había sufrido. Para ello, se seleccionó con el botón

derecho, se pinchó en “Measure” y, en la ventana que aparece, se mantuvo lo seleccionado por defecto; es decir, el desplazamiento que sufre el punto elegido en la dirección del eje X.

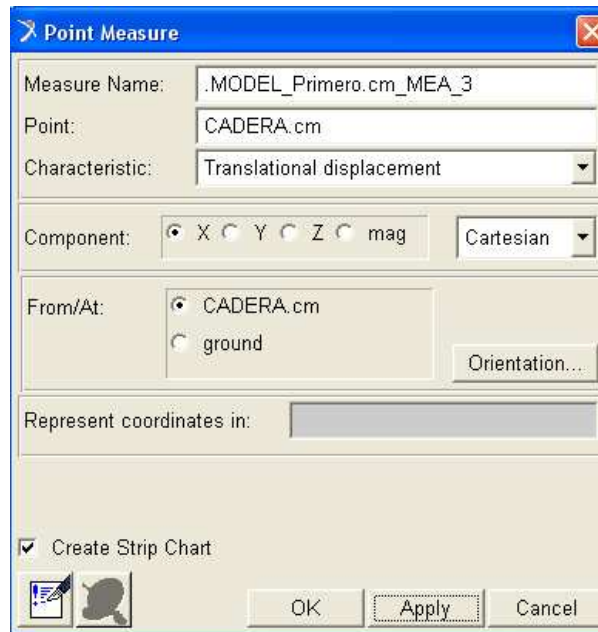
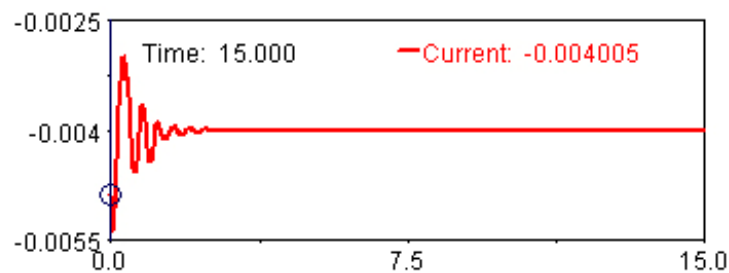


Figura 100: Ventana de medida de magnitudes.

Este comando genera automáticamente una gráfica que refleja la magnitud que se desea medir con respecto al tiempo de simulación. En este caso, la gráfica resultante fue la siguiente:



Gráfica 14: Desplazamiento vs tiempo para 0 mm.

En ella, se aprecia cómo el c.d.m. sufre pequeños desplazamientos oscilatorios al inicio de la simulación, que van siendo cada vez menores hasta que llega un momento en el que queda quieto, lo que se traduce en el momento en el que el robot queda completamente estático. Para el robot a 0 mm sobre el suelo, este tiempo fue de **2,5 s**.

- **Altura de 5 mm.**

La segunda de las pruebas de estabilidad consistió en dejar caer el robot desde una altura de 5 mm (fig. 101).

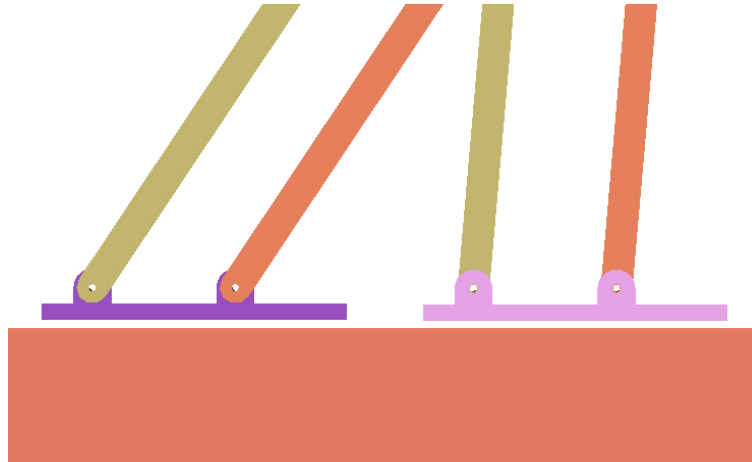
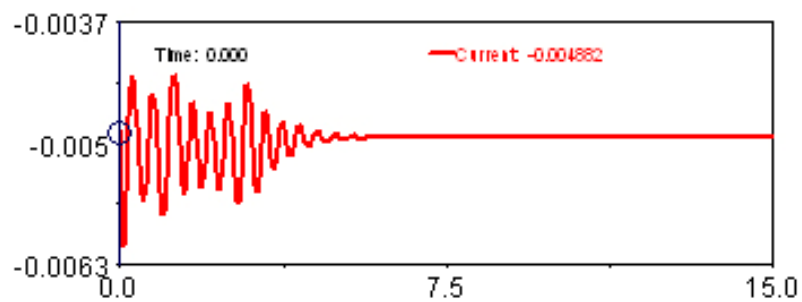


Figura 101: Prueba a 5 mm.

Como es lógico, el robot tardó más tiempo en estabilizarse, lo que se ve reflejado en la gráfica 15. El tiempo transcurrido hasta que el c.d.m. dejó de experimentar desplazamientos fue de 5,5 s.



Gráfica 15: Desplazamiento vs tiempo para 5 mm.

- **Altura de 80 mm.**

Finalmente, se probó a dejar caer el MIMBOT desde una altura de 8 cm, lo cual supone una diferencia de altura sustancial con respecto a la prueba anterior (fig. 102).

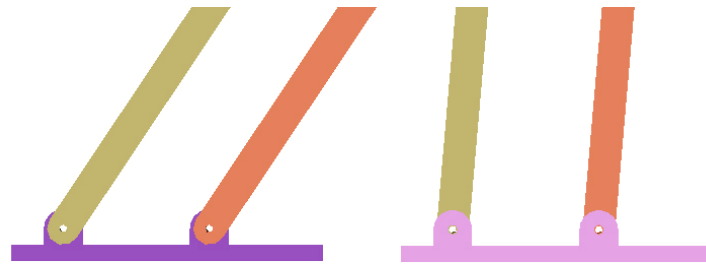
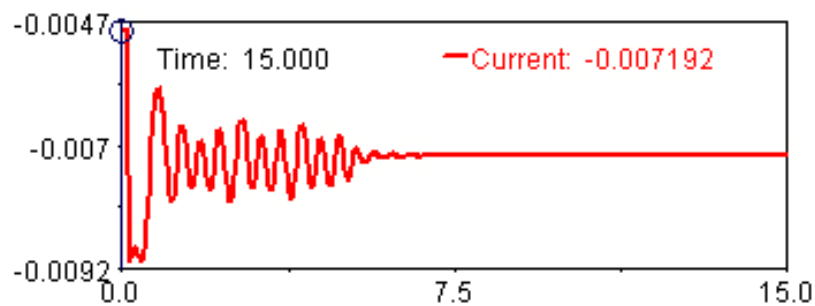


Figura 102: Prueba a 80 mm.

Como se observó en la gráfica 16, el tiempo que el MIMBOT tardó en estabilizarse no fue tanto como podía haberse esperado, teniendo en cuenta el salto de altura que existe entre el anterior caso y éste. El tiempo total que necesitó el robot para quedar estático fue de **7,25 s**.



Gráfica 16: Desplazamiento vs tiempo para 80 mm.

4.5.2. Actuadores parados.

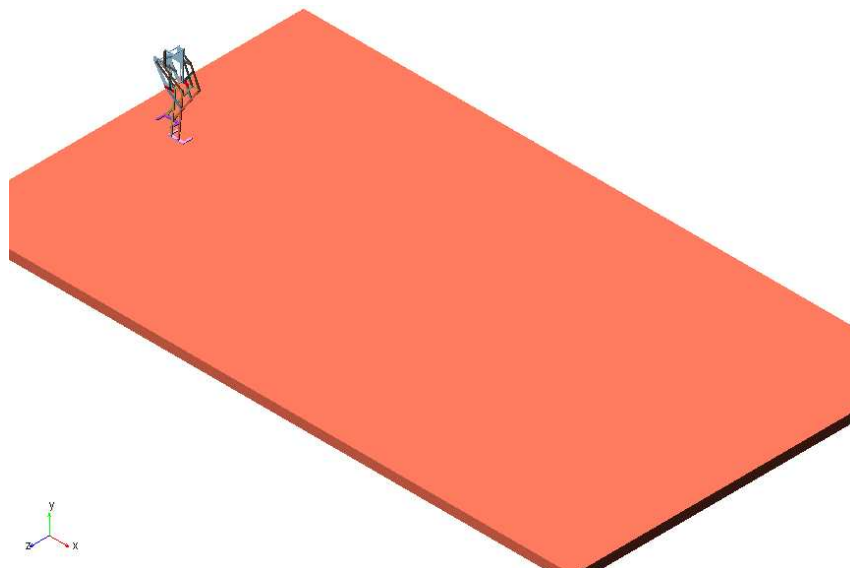
La primera simulación con el MIMBOT en movimiento se efectuó con los actuadores parados durante todo el tiempo, para poder observar en primer lugar el comportamiento de la trayectoria del robot sin más actuaciones que la del motor rotativo.

Antes de poner en marcha la simulación, se elige el tiempo que durará la simulación y el número de pasos. En este caso, se escogieron 40 segundos, para que la trayectoria del robot fuera lo suficientemente larga como para observar su comportamiento, y 1000 pasos, que es una cifra que garantiza una simulación fiable.



Figura 103: Parámetros de la simulación.

A continuación, en la figura 104, se muestran una serie de imágenes tomadas en distintos momentos de la simulación:



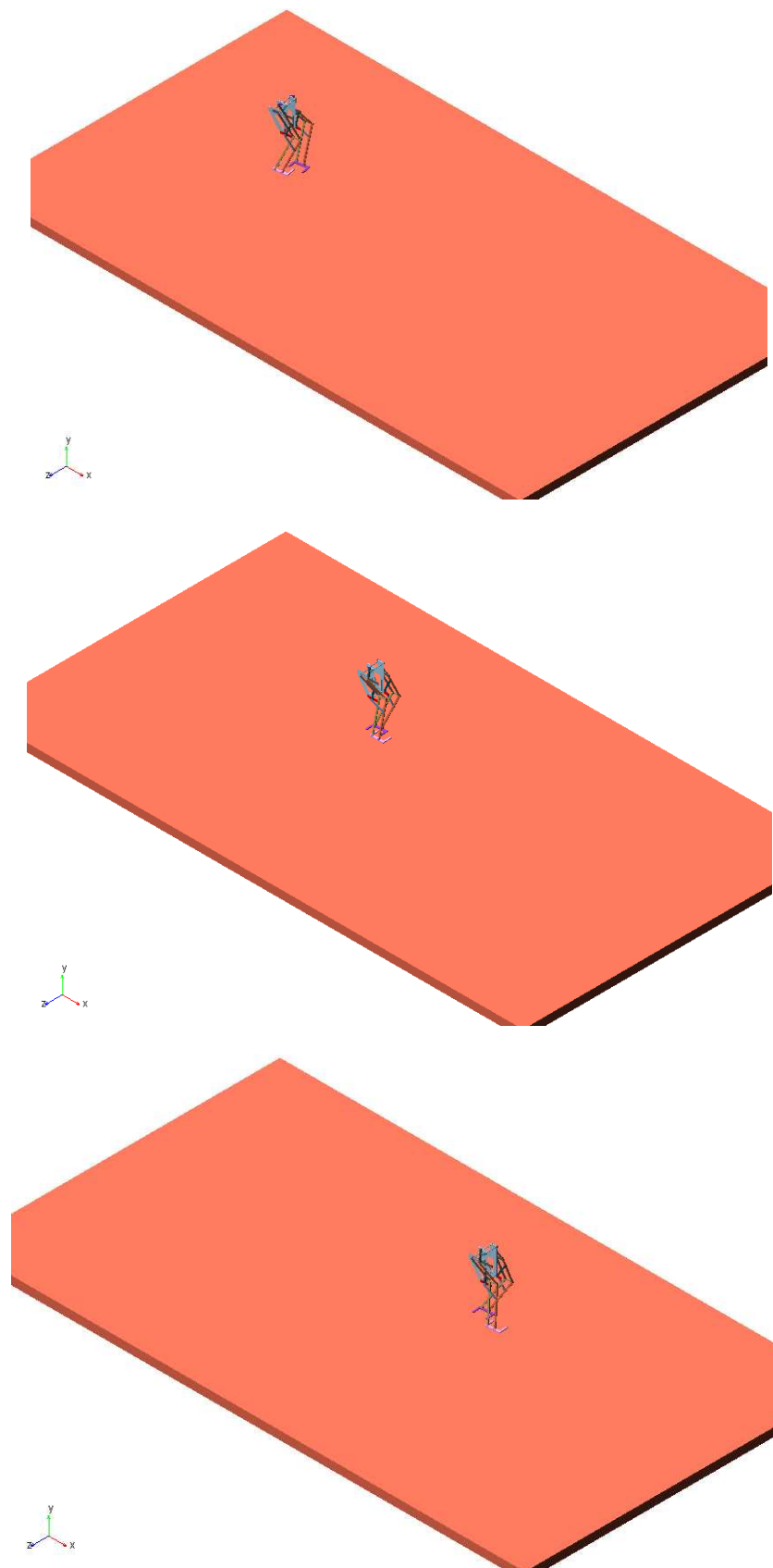
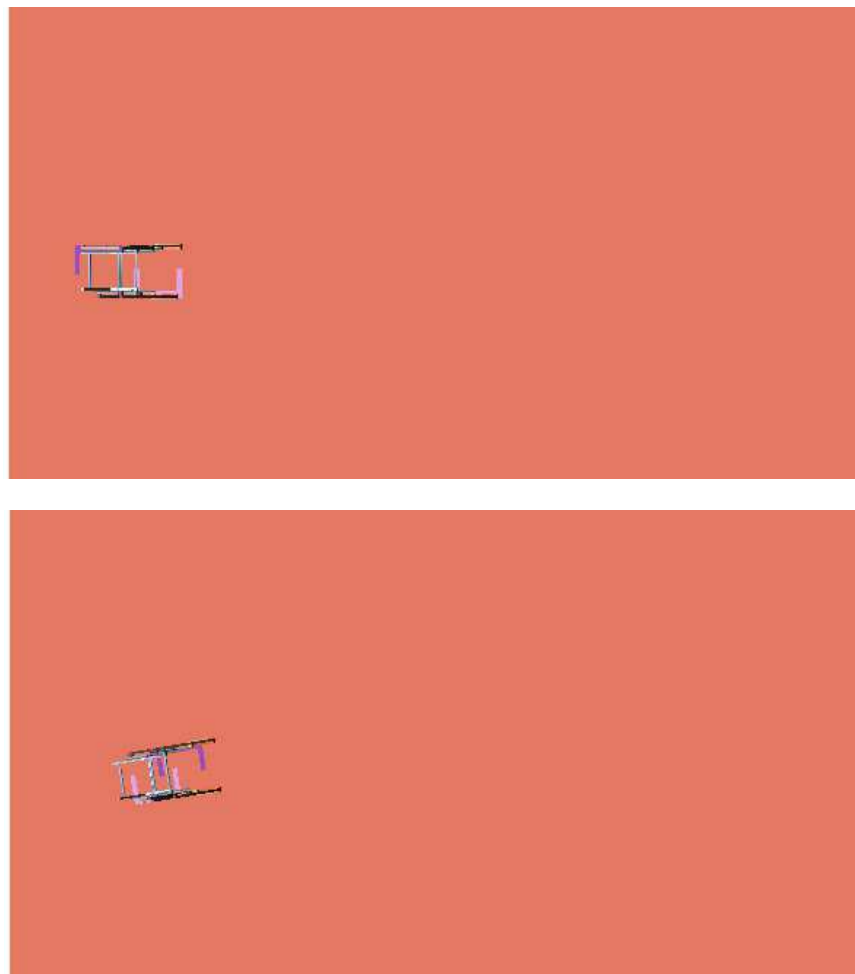


Figura 104: Evolución de la trayectoria del robot.

Tras correr la simulación, se comprobó que, aunque el robot desarrollaba correctamente su caminar, no lo hacía completamente en línea recta, sino que se apreciaba una tendencia a desviarse hacia la izquierda desde el mismo inicio del paso. Este hecho se debe a que, durante el primer paso que efectúa el MIMBOT, al ser el pie izquierdo el que no se encuentra en contacto con el suelo, todo el peso del robot recae sobre el pie derecho. Esto provoca que éste pivote sobre su eje vertical, modificando ligeramente hacia la izquierda la dirección de la trayectoria.

En los sucesivos pasos que da el robot, la dirección de la trayectoria ya no se ve alterada, porque al estar el robot en movimiento el pivotamiento es menor y se ve compensado entre los dos pies. Esto se observa en la figura 105.



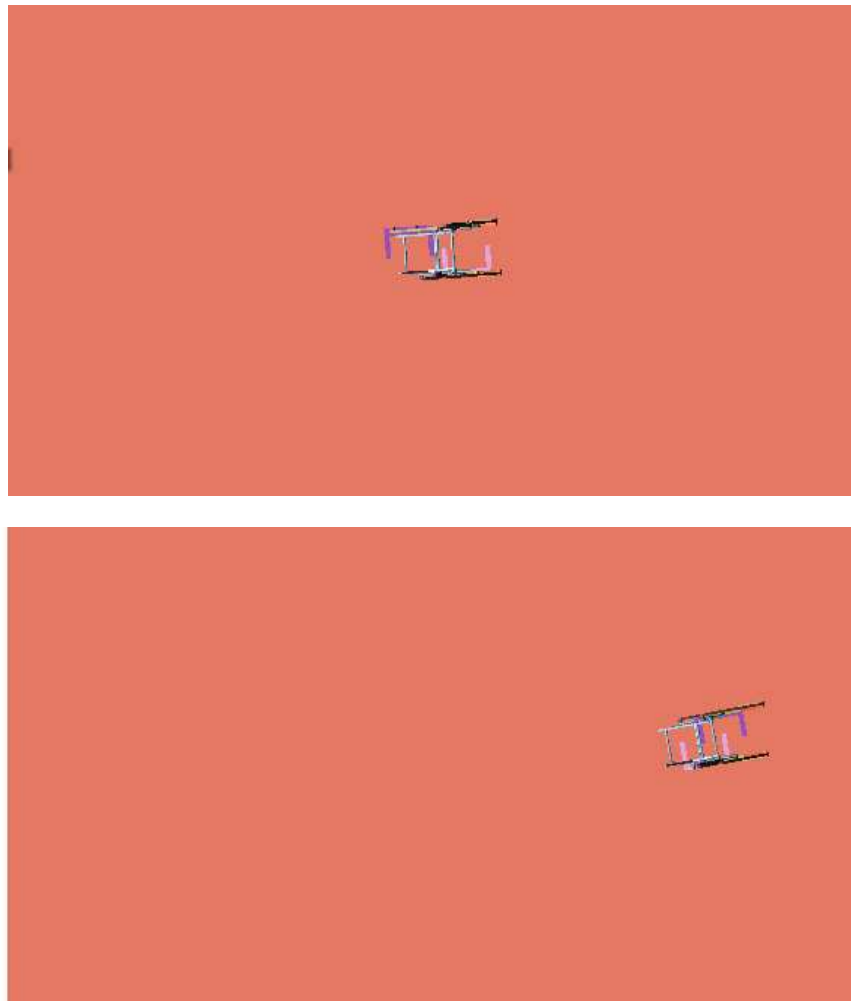
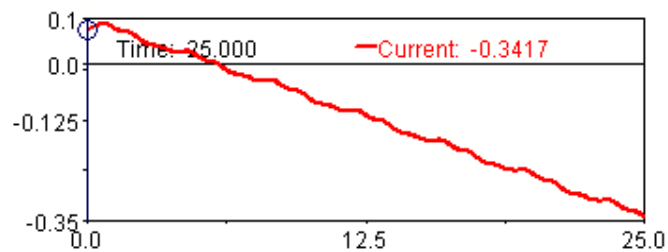


Figura 105: Vista cenital de la trayectoria del robot.

Este comportamiento viene corroborado por la gráfica que se puede obtener del desplazamiento del c.d.m. de la cadera en el eje Z respecto al tiempo:



Gráfica 17: Posición de la cadera en eje Z.

En la gráfica 17 se observa cómo al inicio del paso la trayectoria del MIMBOT gira hacia la izquierda (sentido negativo del eje Z) y, posteriormente, no cambia esta tendencia y continúa

en una línea más o menos recta. Las irregularidades de la línea recta corresponden a los pivotamientos de los pies, que giran momentáneamente la cadera.

4.5.3. Paso izquierdo adelantado.

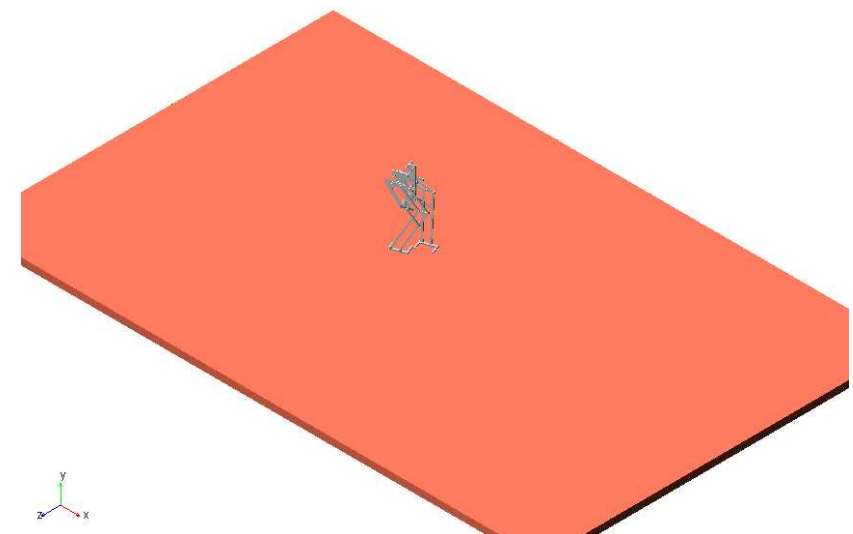
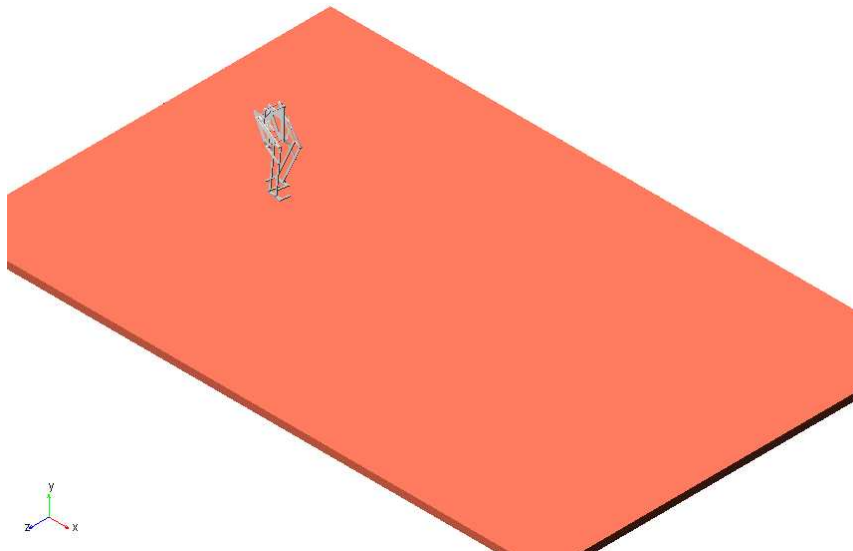
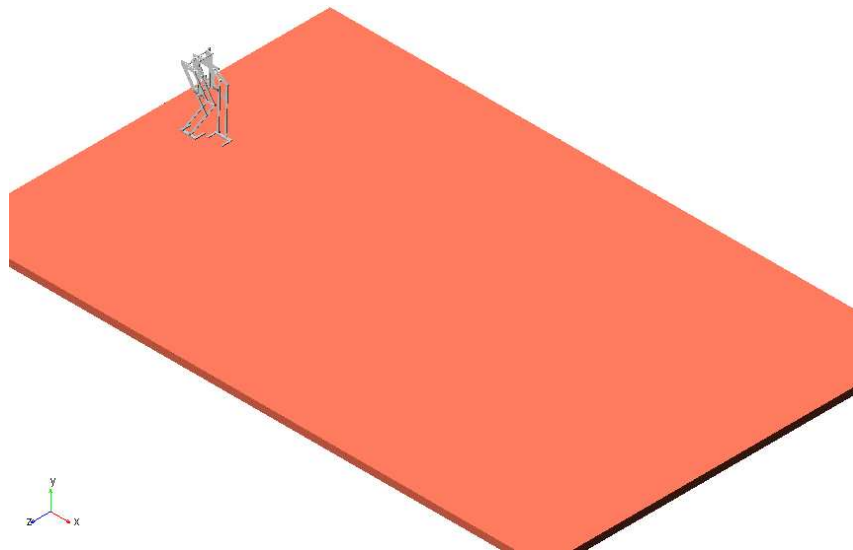
Con el fin de verificar que la teoría sobre la desviación de la trayectoria era correcta, se planteó la posibilidad de efectuar la misma simulación que en el caso anterior, pero cambiando en este caso el pie con el que el MIMBOT inicia el paso.

Para ello, se modificó el modelo en Solid Edge de modo que el pie adelantado fuera el izquierdo, tal y como se describió al final del capítulo V. Después, se importó en MSC. Adams y se implementaron todos los elementos necesarios, al igual que se hizo con el modelo con la pierna derecha adelantada.



Figura 106: Modelo con el pie izquierdo adelantado.

Sin embargo, el resultado de correr una simulación similar a la del modelo con el pie derecho adelantado no fue la esperada: de nuevo la trayectoria se desvió desde el comienzo del movimiento y, al cambiar el pie adelantado, esta vez se produjo en sentido contrario, hacia la derecha; no obstante, tras unos primeros pasos con esa tendencia, la trayectoria fue girando hacia la izquierda, trazando una curva. Este hecho se observa en la siguiente sucesión de imágenes (figs. 107 y 108):



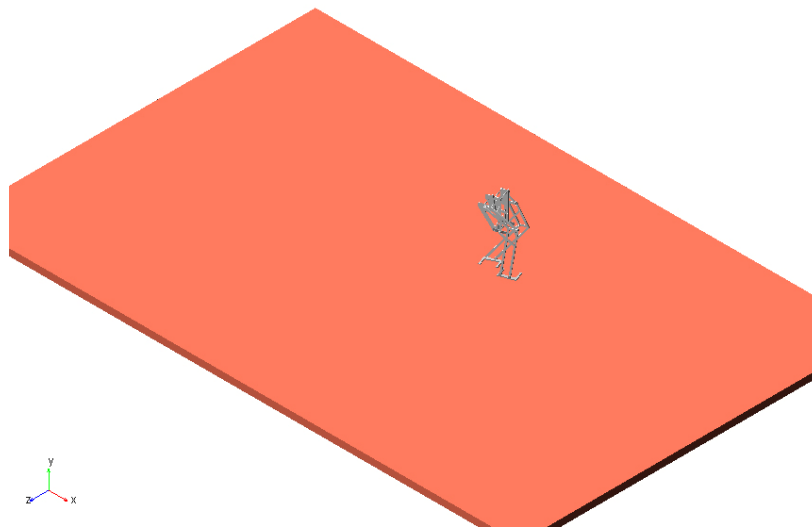
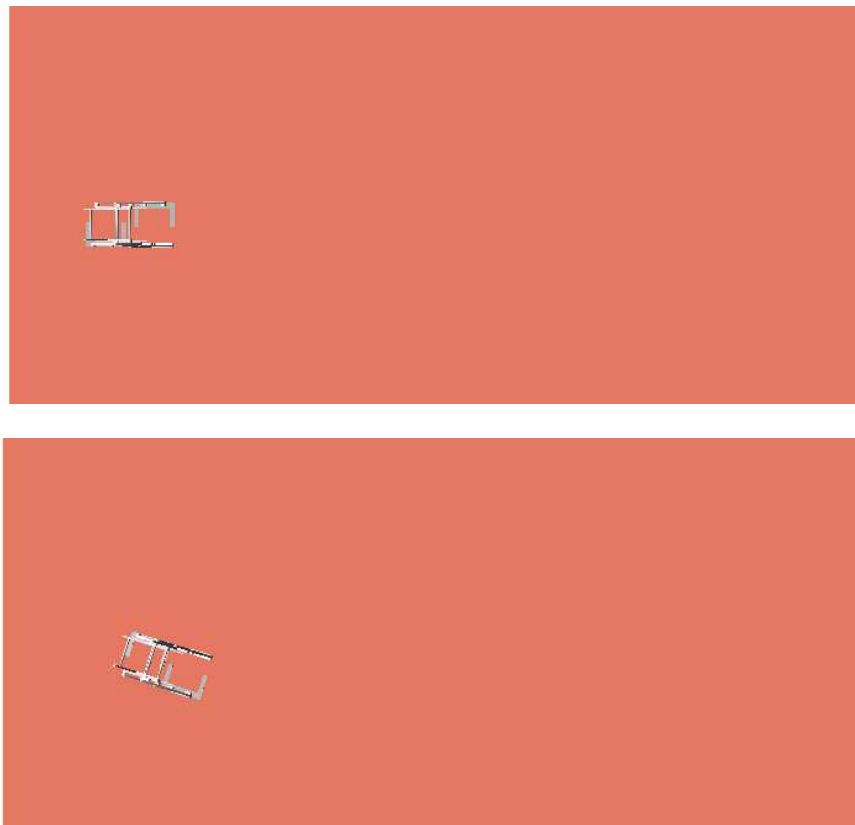


Figura 107: Simulación con el pie izquierdo adelantado.



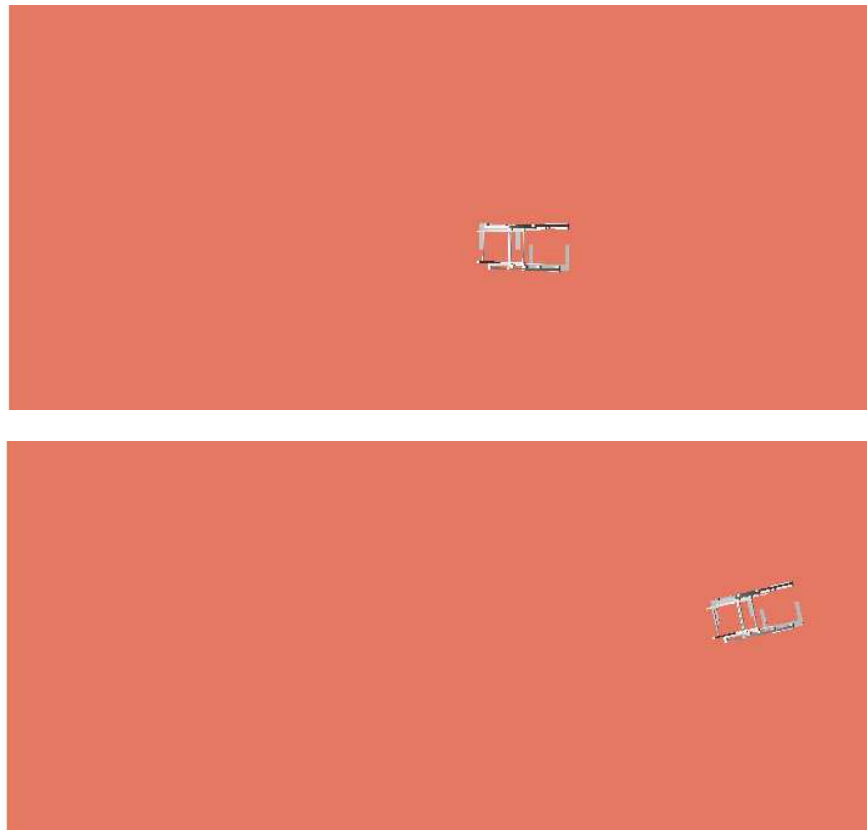
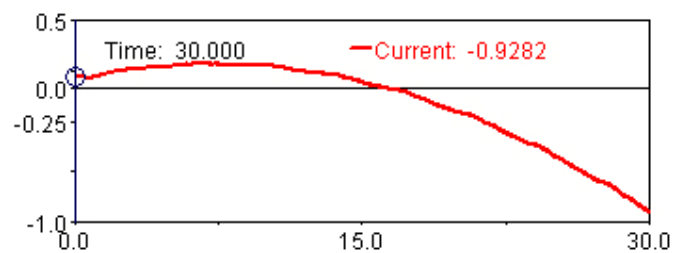


Figura 108: Vista cenital de la trayectoria con el pie izquierdo adelantado.

También esta vez la gráfica de la posición de la cadera respecto al tiempo refleja esta inesperada tendencia del trayecto del robot:



Gráfica 18: Posición de la cadera en eje Z paso cambiado.

Esta observación sugiere un futuro estudio del porqué del comportamiento del robot en estas condiciones de funcionamiento.

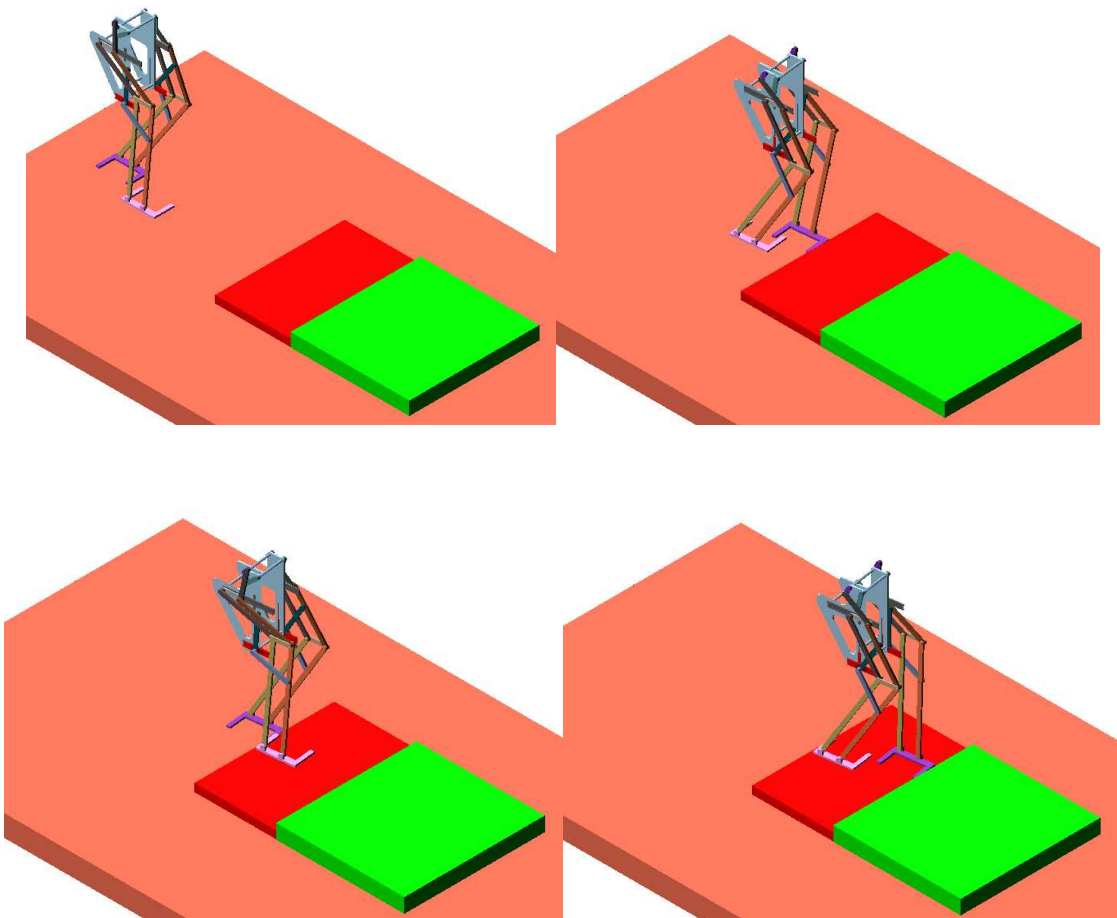
4.6. EJERCICIOS: APLICACIÓN DE LAS HABILIDADES DEL ROBOT MIMBOT A DOS CASOS DE SUBIR ESCALONES.

4.6.1. Modelo sin inestabilidades.

En el primero de los dos ejercicios que se realizaron, el MIMBOT tenía por misión caminar hacia dos escalones existentes en el suelo y subirlos.

El proceso se planteó de la siguiente manera: el MIMBOT, partiendo del reposo, debía ponerse en marcha en dirección a los dos escalones; antes de llegar a los escalones, era necesario efectuar un acortamiento del paso izquierdo, para que este pie no impactara contra la base del primer escalón; el pie derecho, por su parte, acometería la subida del primer escalón; con el pie derecho apoyado en el primer escalón, el pie izquierdo subiría igualmente hasta este escalón y, una vez apoyado, el pie derecho efectuaría la subida del segundo escalón, donde posteriormente se le uniría de nuevo el izquierdo; finalmente, el robot se detendría en el rellano del segundo escalón.

En este apartado se explicará con detalle el comportamiento de los actuadores en cada momento del ejercicio, el cual se muestra en una primera visión general en la figura 109:



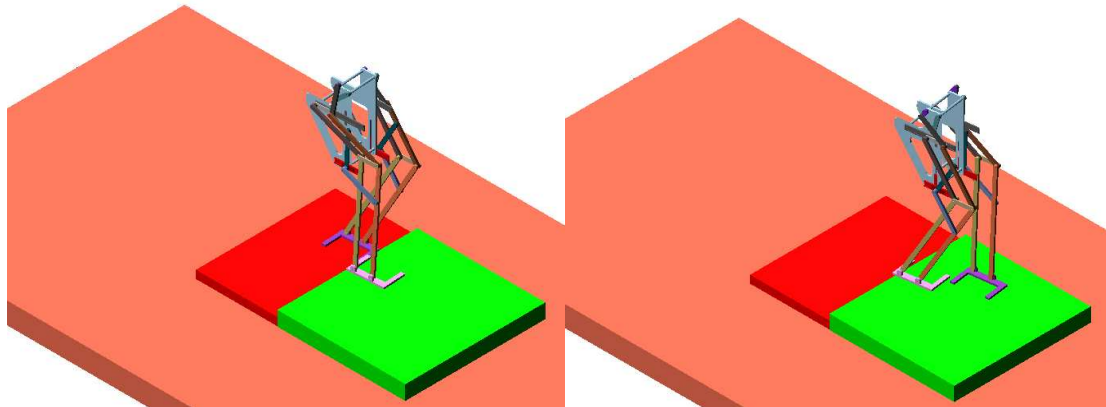


Figura 109: Primer ejercicio de subida de escalones.

En cuanto a las funciones implementadas en los actuadores para regular su movimiento, éstas fueron de tipo SENO (SIN), dado que se adecuaban bien a las exigencias del movimiento, pudiendo elegir la amplitud y la velocidad. Estas funciones fueron implementadas específicamente para funcionar en este modelo en los instantes requeridos; en futuros modelos reales del robot, éste contaría con sensores que midieran distancias en el espacio, y de esta forma el sistema de control podría efectuar los cálculos pertinentes para adaptarse en tiempo real a los movimientos exigidos a la pierna en cada situación.

Previo a la simulación.

La creación de los escalones resulta trivial, ya que se realiza de forma similar a la del suelo, como se explicó al inicio de este capítulo. Sí es importante mencionar la adición de una junta extra al modelo situada entre la cadera y el suelo, llamada “Primitive Joint: Parallel Axes” (fig. 110). Esta junta evita el balanceo de la cadera, manteniéndola en la misma orientación con respecto al suelo. El motivo de su inclusión fue que el objetivo principal de la simulación sería mostrar con la mayor claridad posible el modo en el que los actuadores funcionaban para permitir las nuevas habilidades del robot.

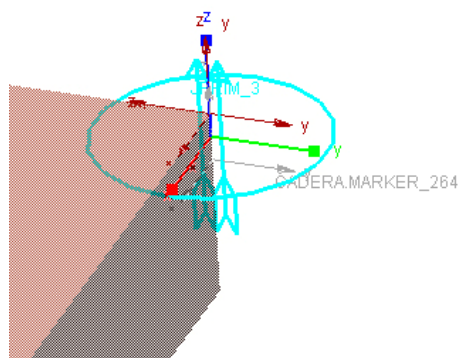


Figura 110: Junta de Parallel Axes.

Por otra parte, se decidió no restringir el desvío que sufría el robot en su caminar, ya que al no ser de gran magnitud, no impedía al robot subir los escalones ni molestaba en la observación de los actuadores.

El valor de la velocidad angular proporcionada al motor rotativo fue de $90^\circ/\text{s}$, es decir, $\pi/2$ rad/s.

La simulación se realizó durante 20 s y 2000 pasos.

En cuanto a las funciones utilizadas, en este caso se quisieron implementar funciones sinusoidales, ya que se adecuaban a las características del ejercicio.

La función de movimiento del motor ("motion 1") fue la siguiente:

```
if(time-2:0,0,90d*(time-2))-if(time-17.6:0,0,90d*(time-17.6))
```

La función implementada en la deslizadera derecha ("motion 2") fue:

```
if(time-8.25:0,0,(SIN(time-8.25)/50))-if(time-9.25:0,SIN(time-9.25)/50,SIN(time-9.25)/50)
-if(time-10.25:0,0,-SIN(time-10.25)/50)
-if(time-12:0,0,(-SIN(time-12)/50))-if(time-13:0,SIN(time-13)/50,SIN(time-13)/50)
-if(time-14:0,0,-SIN(time-14)/50)
```

La función de la deslizadera izquierda ("motion 3") fue:

```
if(time-9.25:0,0,(SIN(time-9.25)/50))-if(time-10.25:0,SIN(time-10.25)/50,SIN(time-10.25)/50)
-if(time-11:0,0,-SIN(time-11)/50)
+if(time-13.75:0,0,(SIN(time-13.75)/50))-if(time-14.75:0,SIN(time-14.75)/50,
SIN(time-14.75)/50)
-if(time-15.75:0,0,-SIN(time-15.75)/50)
```

En cuanto a las funciones implementadas en los actuadores horizontales, la del derecho ("motion 4") fue la que viene a continuación.

```
if(time-8.5:0,0,(SIN(time-8.5)/50))-if(time-9.5:0,SIN(time-9.5)/50,SIN(time-9.5)/50)  
-if(time-10.5:0,0,-SIN(time-10.5)/50)+  
if(time-12.5:0,0,(SIN(time-12.5)/50))-if(time-13.5:0,SIN(time-13.5)/50,SIN(time-13.5)/50)  
-if(time-14.5:0,0,-SIN(time-14.5)/50)
```

Mientras que la función para el actuador horizontal izquierdo ("motion 5") fue la siguiente:

```
if(time-6.75:0,0,(-SIN(time-6.75)/25))-if(time-7.75:0,-SIN(time-7.75)/25,-SIN(time-7.75)/25)  
-if(time-8.75:0,0,SIN(time-8.75)/25)
```

Puesta en marcha del robot.

La simulación comienza con el MIMBOT en reposo, para facilitar la observación posterior del inicio de paso en el Postprocesador. En un caso sin restricciones, esta espera también sería de utilidad para conseguir la estabilidad del robot antes del inicio del movimiento.

Tras unos segundos, el robot se pone en marcha en dirección a los escalones, con la velocidad antes especificada y sufriendo el ligero desvío que ya se observó en las primeras pruebas realizadas sobre suelo.

Acortamiento de paso antes de llegar al primer escalón.

La primera muestra de la aplicación de los actuadores viene dada por la necesidad de que el pie izquierdo acorte su paso antes de llegar al primer escalón. De no ser así, este pie colisionaría con la base del escalón, pudiendo provocar desequilibrios e incluso la caída.

Como se ve en la figura 111, el actuador horizontal izquierdo efectúa un movimiento hacia la parte trasera del MIMBOT durante el vuelo del pie izquierdo. Gracias a ello, el pie acorta su paso e impide la colisión, situándose frente al escalón.

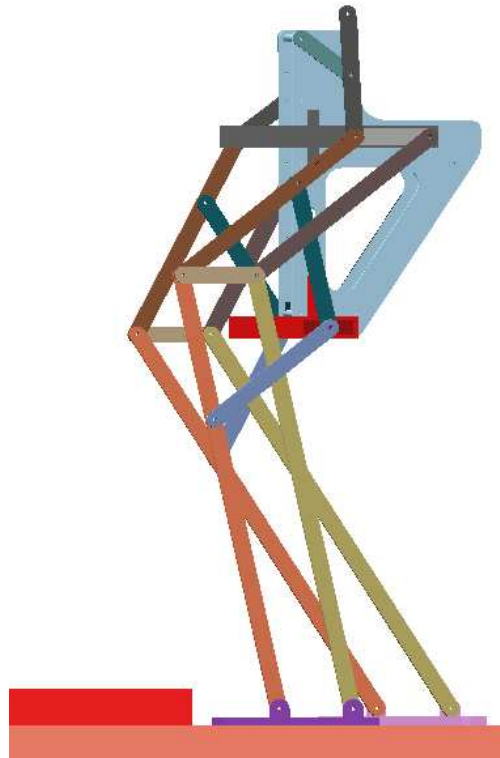


Figura 111: Acortamiento del paso del pie izquierdo.

Posteriormente, cuando el actuador ha llegado al máximo punto del recorrido que se le ha impuesto, regresa a su posición inicial para evitar que los sucesivos pasos continúen siendo acortados.

Ascensión del primer escalón.

Esta acción es efectuada en primer lugar por el pie derecho. Para ello, la deslizadera del lateral derecho se eleva desde el momento en el que el pie se levanta del suelo, de modo que pueda salvar el obstáculo que supone el escalón y baja hasta su posición inicial a tiempo de posarse sobre el escalón.

Además, existe un alargamiento de la zancada con el fin de que el pie derecho se apoye completamente sobre el primer escalón; de otro modo, quedaría un tramo del pie apoyado en el aire.

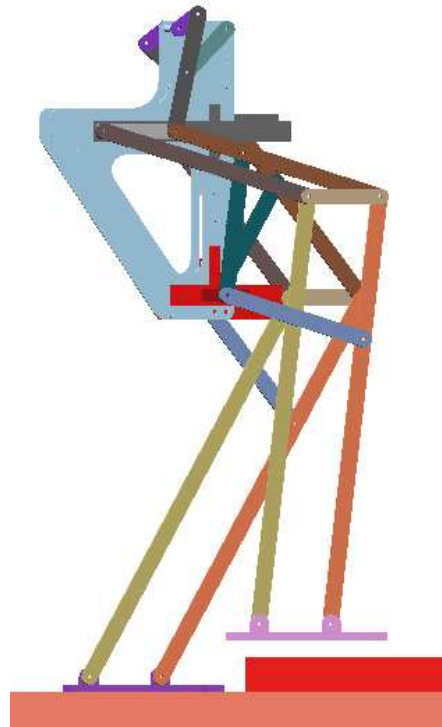


Figura 112: Elevación del paso del pie derecho.

Después, le toca el turno al pie izquierdo, que, de la misma manera, eleva el paso para unirse al pie derecho en el primer peldaño:

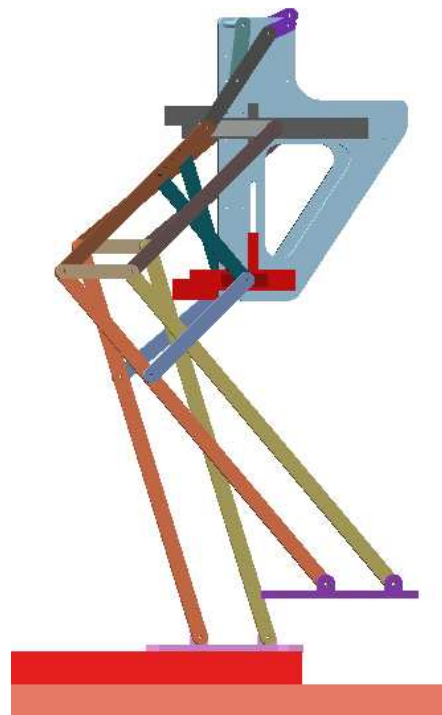


Figura 113: Elevación del paso del pie izquierdo.

Ascensión del segundo escalón.

El segundo peldaño es alcanzado en primer lugar, de nuevo, por el pie derecho. En esta ocasión, también existe un alargamiento de la zancada con el fin de que el pie derecho se apoye completamente sobre el segundo escalón.

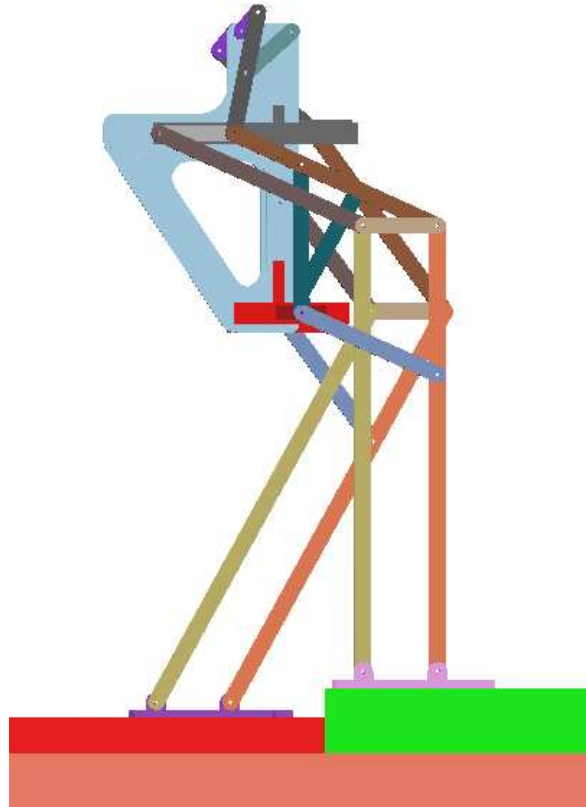


Figura 114: Elevación y alargamiento de la zancada.

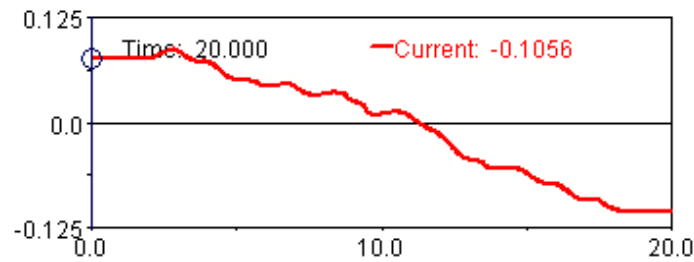
El pie izquierdo no necesita esta vez del funcionamiento de los actuadores, ya que, al tratarse de un escalón con una altura menor que la del primero y al ayudarse del apoyo del pie derecho, lo salva sin dificultad.

Fin del recorrido.

Finalmente, una vez el robot ha salvado los dos escalones, efectúa dos pasos sobre el rellano y queda parado en la misma posición que la inicial.

Llegados al final de la simulación, se pueden obtener gráficas que corroboren los resultados observados visualmente durante la animación.

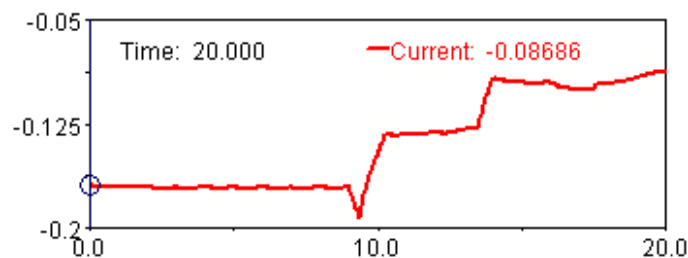
En primer lugar, se presentan dos gráficas relativas al desplazamiento de la cadera, tomando como punto de referencia su c.d.m. La gráfica 19 representa la posición de la cadera respecto al eje Z y refleja la desviación que sufre el robot a lo largo de su trayectoria debido al pivotamiento explicado en las primeras simulaciones sobre suelo.



Gráfica 19: Posición cadera eje Z.

El inicio recto de la curva corresponde al período de estabilización del MIMBOT, y posteriormente comienza la desviación, en cuanto el robot se pone en marcha.

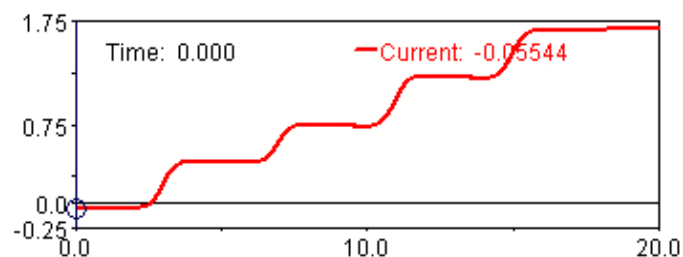
Por otra parte, también se puede obtener la posición de la cadera respecto al eje vertical Y:



Gráfica 20: Posición cadera eje Y.

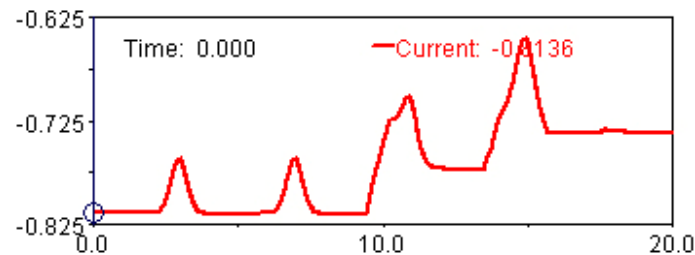
El primer pico descendente corresponde al leve descenso de la cadera debido al inicio del ascenso de la deslizadera izquierda antes de que el pie se despegue del suelo. Posteriormente, se observan dos escalones que corresponden con los períodos de ascenso al primer y segundo peldaños.

A continuación, también se analizan las gráficas de las posiciones de los pies, que resultan muy esclarecedoras. El punto representativo del pie se tomó en la articulación entre éste y la tibia. La gráfica de la posición del pie izquierdo respecto al eje X muestra cómo, en el segundo tramo de ascenso de la curva, éste es de menor longitud que el resto, dado que se corresponde al momento de acortamiento del paso antes de llegar al primer escalón.



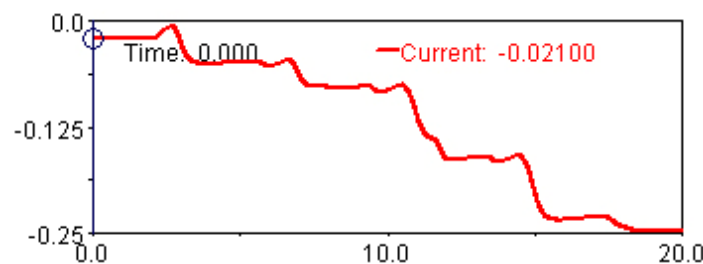
Gráfica 21: Posición pie izquierdo eje X.

En cuanto a la posición respecto al eje Y, representada en la gráfica 22, se tienen, en primer lugar, dos picos de igual altura que corresponden con los dos primeros pasos. El tercero es más elevado, ya que existe elevación del paso, y se posa a una altura superior a la del suelo, en el primer escalón. El último pico también es más elevado que el de los pasos normales, ya que corresponde a la segunda elevación del paso para alcanzar el último peldaño.



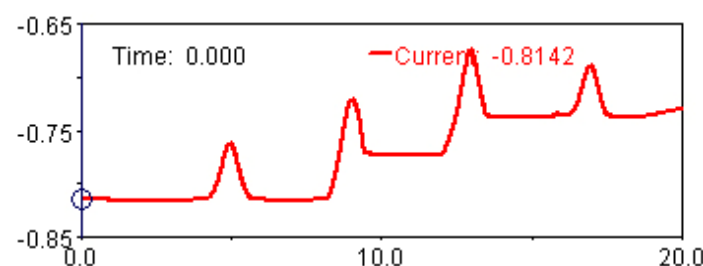
Gráfica 22: Posición pie izquierdo eje Y.

En el eje Z también se puede observar una de las particularidades del comportamiento del pie, y es el pivotamiento que sufre antes de iniciar el paso, representado por los ligeros picos que ascienden antes de cada descenso de la curva:



Gráfica 23: Posición pie izquierdo eje Z.

También resulta de interés comprobar cómo las gráficas correspondientes al pie derecho se corresponden con el comportamiento observado en la animación. Como muestra, la gráfica 24 representa la posición de este pie respecto al eje Y. El primer pico refleja la altura que alcanza el primer paso, mientras que el segundo pico ya muestra cómo se eleva el paso para subir al primer escalón y, seguidamente, se vuelve a elevar para alcanzar el segundo. El último pico corresponde al paso normal que se da ya en el rellano antes de finalizar la simulación.

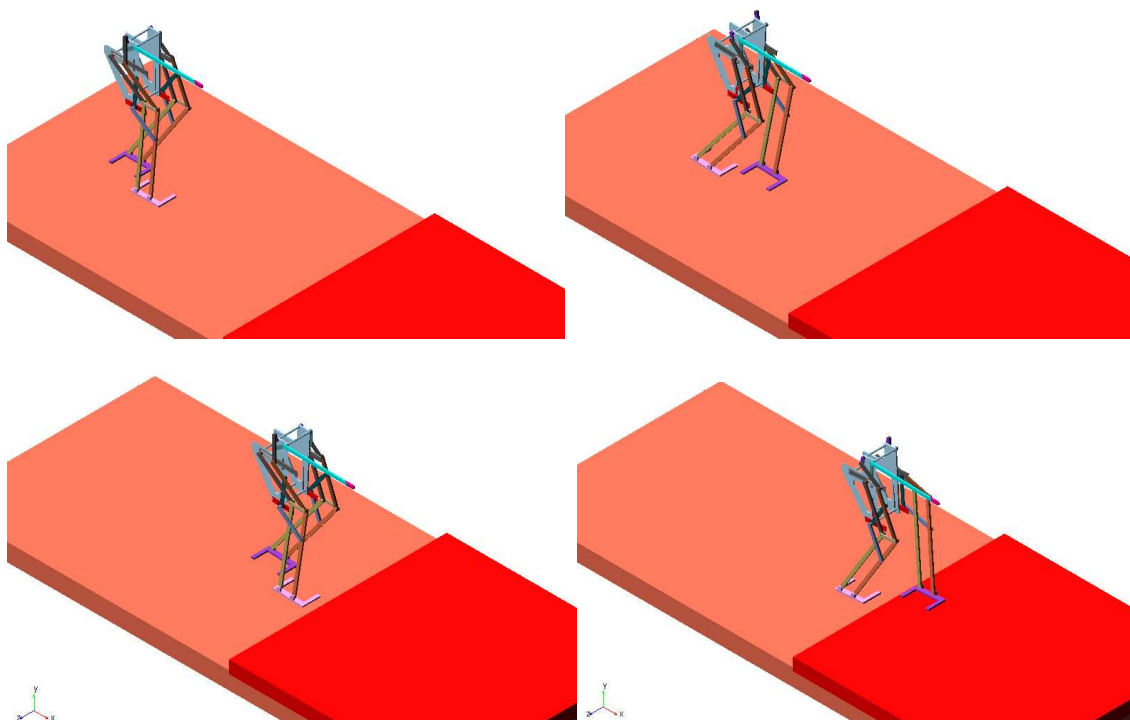


Gráfica 24: Posición pie derecho eje Y.

4.6.2. Modelo con estabilizador horizontal.

El segundo de los ejercicios que se llevaron a cabo también tenía como objetivo aplicar el uso de los actuadores a un caso en el que se requiriera de su intervención. Para esta ocasión, se llevó a cabo una primera prueba sin la inclusión de la junta que impedía la caída del robot en el primer ejercicio, pero el resultado fue que el MIMBOT no se mantenía en pie más que durante unos instantes. El ejercicio consistió en la puesta en marcha del robot, el trayecto hasta un escalón instalado sobre el suelo, la ascensión del escalón por parte de los dos pies haciendo uso de los actuadores y su posterior parada. No obstante, dado que se quería mostrar el balanceo existente cuando los pies se apoyaban en el suelo, se planteó la posibilidad de añadir al modelo un estabilizador horizontal que lo guiara en línea recta sin amortiguar el balanceo en su mayor medida. Este balanceo, unido al deslizamiento de los pies sobre el suelo, supuso un factor que complicó en gran medida la implementación correcta de los actuadores.

En este apartado se explicará con detalle el comportamiento de los actuadores en cada momento del ejercicio, el cual se muestra en una primera visión general en las imágenes de la figura 115:



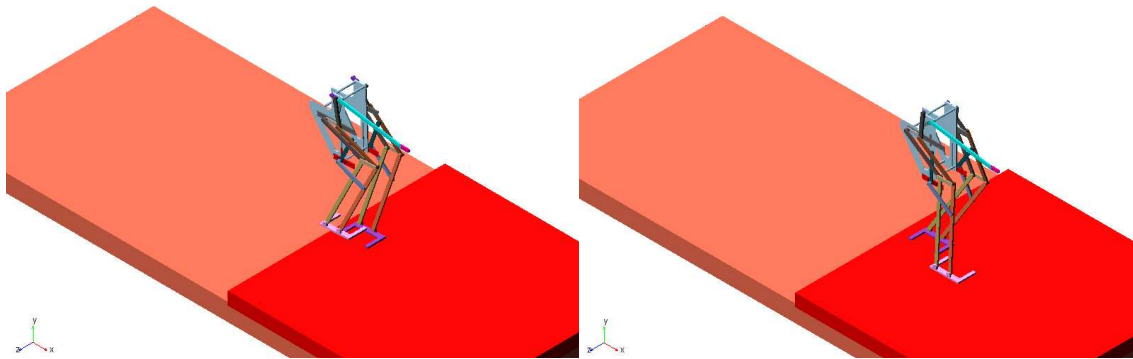


Figura 115: Segundo ejercicio de subida de escalones.

Previo a la simulación.

La solución del estabilizador horizontal fue utilizada en un anterior proyecto [3], con resultados satisfactorios. Para la creación del estabilizador horizontal, se modelaron directamente en MSC. Adams dos eslabones ("Rigid Body: Link"), uno más largo y otro de corta longitud, posicionados en sentido horizontal y unidos en sus extremos mediante una junta de rotación, constituyendo el estabilizador el conjunto de los dos (fig. 116).



Figura 116: Estabilizador horizontal.

Posteriormente, el eslabón más largo se unió mediante otra junta de rotación al punto de articulación entre el balancín y la cadera. Finalmente, se estableció en el eslabón pequeño del estabilizador una junta traslacional entre él y el espacio "ground". De este modo, la trayectoria del eslabón no se saldría nunca de una línea horizontal, aportando estabilidad al modelo y permitiendo su balanceo gracias a las juntas de rotación.

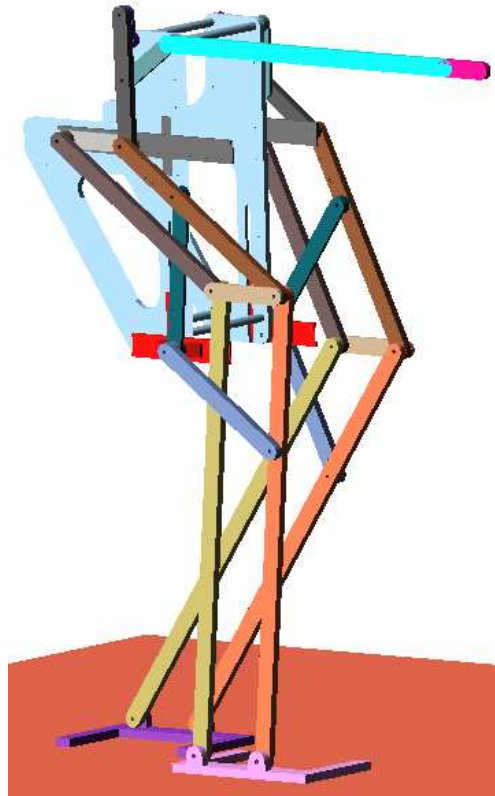


Figura 117: Modelo con estabilizador horizontal.

La creación del escalón fue similar a la del primer ejercicio, y el valor de la velocidad angular proporcionada al motor rotativo fue de $250^\circ/\text{s}$. Se eligió una velocidad mayor que en el otro ejercicio, ya que así se evitaban más inestabilidades que aparecían al probar velocidades menores.

Se realizó una simulación de 8 s y 800 pasos.

Las funciones implementadas en este ejercicio se especifican a continuación. La función del motor rotativo ("motion 1") fue:

```
if(time-2:0,0,250d*(time-2))-if(time-6.25:0,0,250d*(time-6.25))
```

La función de la deslizadera derecha ("motion 2") fue la siguiente:

```
if(time-5.5:0,0,0.0125*(time-5.5))-if(time-6:0,0,0.0125*(time-6))  
-if(time-6:0,0,0.025*(time-6))-if(time-6.25:0,0,-0.025*(time-6.25))
```

En la deslizadera izquierda ("motion 3") se implementó la función siguiente.

```
if(time-5:0,0,0.05*(time-5))-if(time-5.5:0,0,0.05*(time-5.5))  
-if(time-5.5:0,0,0.05*(time-5.5))-if(time-6:0,0,-0.05*(time-6))
```

En lo que a los actuadores respecta, el derecho (“motion 4”) se mueve mediante la siguiente función:

```
if(time-5.25:0,0,-0.05*(time-5.25))-if(time-5.75:0,0,-0.05*(time-5.75))  
-if(time-5.75:0,0,-0.05*(time-5.75))-if(time-6.25:0,0,0.05*(time-6.25))
```

Finalmente, la función implementada en el actuador izquierdo (“motion 5”) es la que aparece a continuación:

```
if(time-5:0,0,0.05*(time-5))-if(time-5.5:0,0,0.05*(time-5.5))  
-if(time-5.5:0,0,0.05*(time-5.5))-if(time-6:0,0,-0.05*(time-6))
```

Puesta en marcha.

La simulación comienza con el MIMBOT en reposo, para facilitar la observación posterior del inicio de paso en el Postprocesador. Además, esta espera también permite al robot estabilizarse antes del inicio del movimiento.

Tras unos segundos, el robot se pone en marcha en dirección al escalón, con la velocidad antes especificada y, en esta ocasión, sin sufrir el desvío que ya se observó en las primeras pruebas realizadas sobre suelo, gracias a la guía del estabilizador.

Ascensión de la pierna izquierda al escalón.

La pierna izquierda es la que primero debe elevarse para subir el escalón. Para conseguirlo, el actuador que mueve la deslizadera izquierda la hace ascender durante el vuelo del pie izquierdo con el fin de que no tropiece con el peldaño. Simultáneamente, el actuador horizontal se desplaza alargando la zancada; de este modo, el pie cae en toda su planta sobre el peldaño, evitando posibles desequilibrios si quedara en el borde del peldaño (hecho que el balanceo también puede provocar). Ambos actuadores vuelven a sus posiciones originales en el momento en el que han cumplido su función, que coincide con el período durante el cual el pie se asienta en su posición. Todo esto se observa en la figura 118:

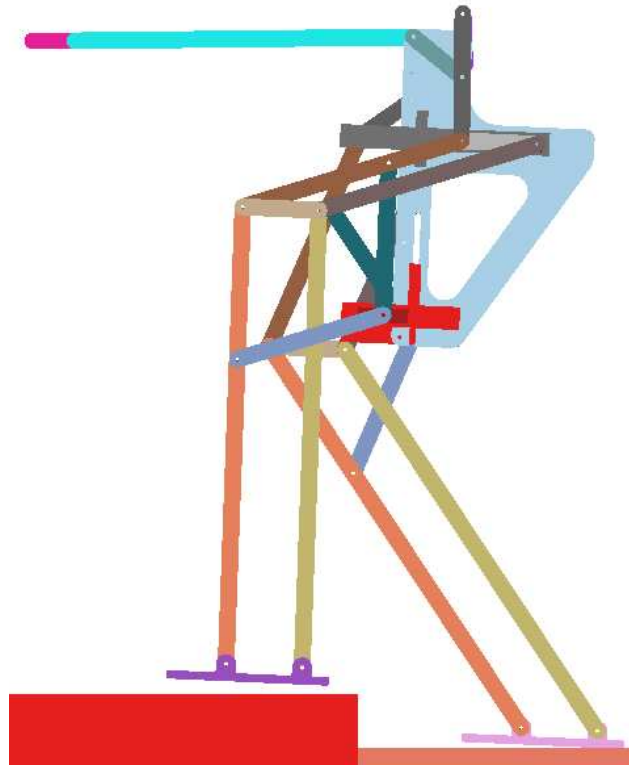


Figura 118: Ascensión del pie izquierdo.

Ascensión de la pierna derecha al escalón.

La pierna derecha asciende al escalón cuando el pie izquierdo ya lo ha subido. La primera acción de los actuadores, antes incluso de que el pie derecho se separe del suelo, se produce por parte del actuador horizontal: se comienza a desplazar en el sentido negativo del eje X cuando el pie izquierdo está apoyándose en el escalón; por una parte, para amortiguar el balanceo de los pies y, por otra, para prepararse para superar el borde del escalón, ayudando al movimiento vertical de la deslizadera. Para el momento en el que el pie se apoya en el escalón, este actuador ya ha recuperado su posición inicial.

En cuanto al actuador vertical, como es habitual, realiza la función de sortear el borde del escalón, elevándose en el momento apropiado y volviendo a descender y recuperar su posición inicial en el momento en el que el pie se posa, evitando el desequilibrio que causaría la diferencia de longitud entre las piernas del robot.

La sucesión de acciones se puede observar con detalle en las imágenes de la figura 119.

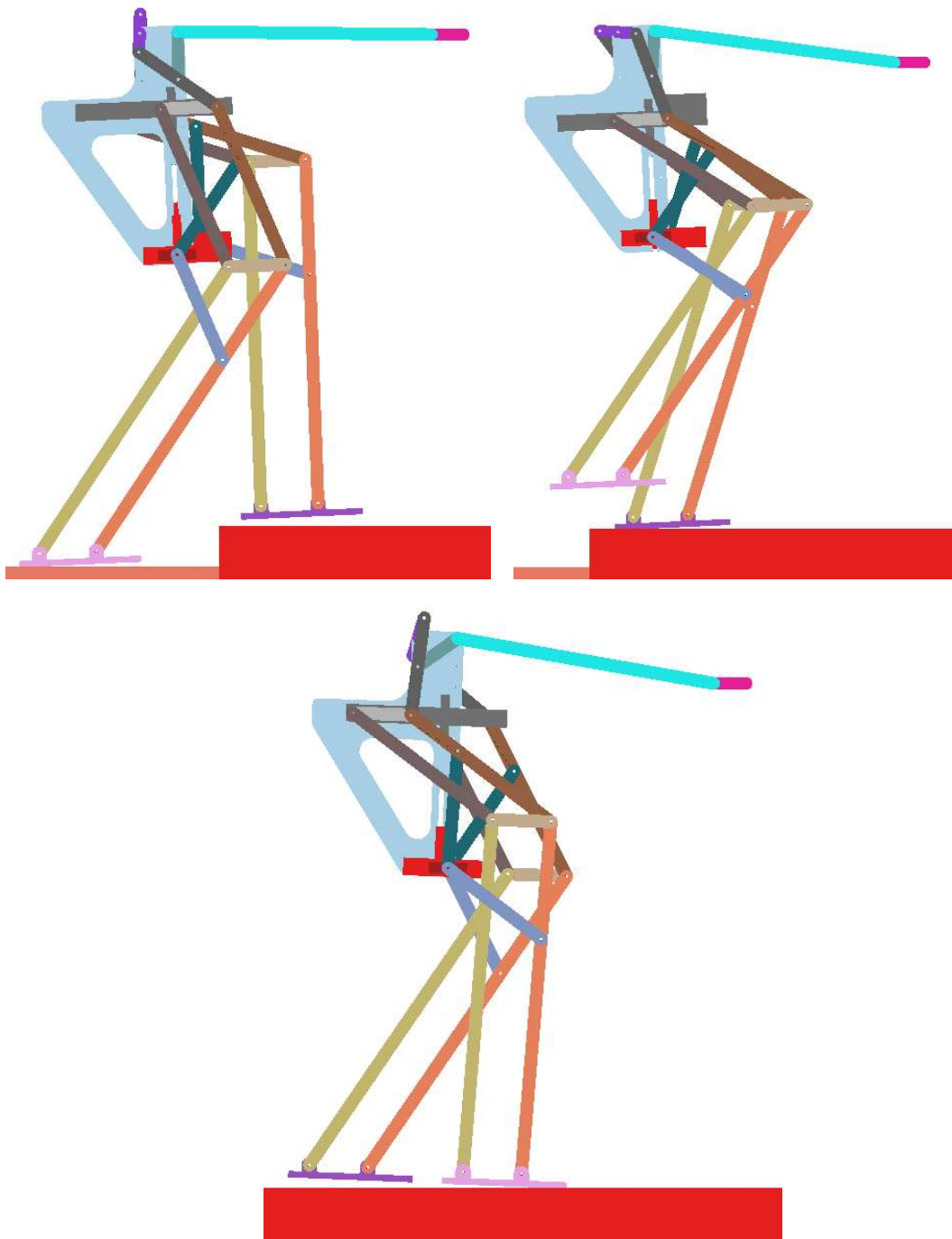


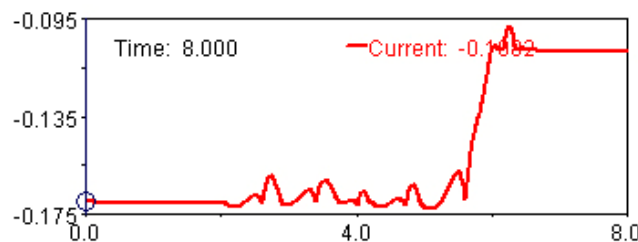
Figura 119: Ascensión del pie derecho.

Fin del recorrido.

Finalmente, una vez salvado el escalón, el motor rotativo se detiene y el MIMBOT queda situado en la misma posición que la inicial, tras efectuar unos últimos balanceos antes de quedar en reposo.

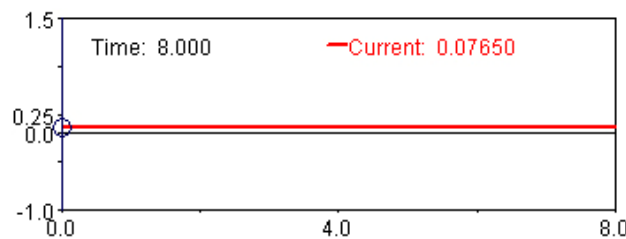
Una vez concluida con éxito la simulación, es el momento de apoyar los resultados obtenidos con gráficas de posición de los elementos más representativos del robot.

Primeramente, se puede comprobar la trayectoria que recorre la cadera, tomando medidas en su c.d.m. En la gráfica 25 se muestra su desplazamiento en el eje Y; se observa, además del tramo ascendente durante el cual la cadera sube al escalón, los pequeños picos producidos por el balanceo del robot entero.



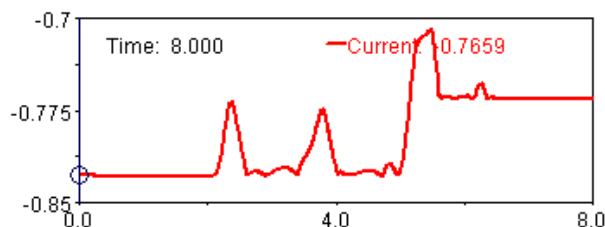
Gráfica 25: Posición cadera eje Y II.

También se comprobó que el estabilizador horizontal cumplió con su misión, ya que no se observaron desplazamientos en el eje Z, es decir, la trayectoria del robot se mantuvo recta. Esto se cumple, como es natural, para el resto de piezas del robot.



Gráfica 26: Posición cadera eje Z II.

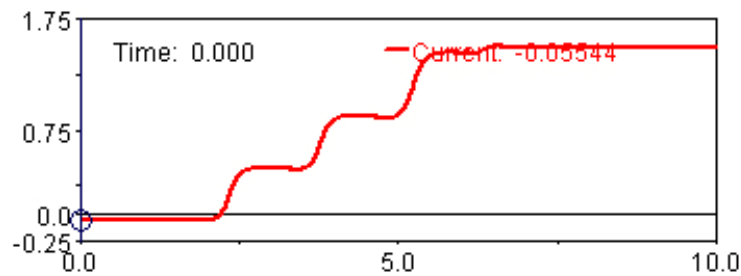
La gráfica 27, obtenida de la posición del pie izquierdo respecto al eje Y, también resulta reveladora.



Gráfica 27: Posición pie izquierdo eje Y II.

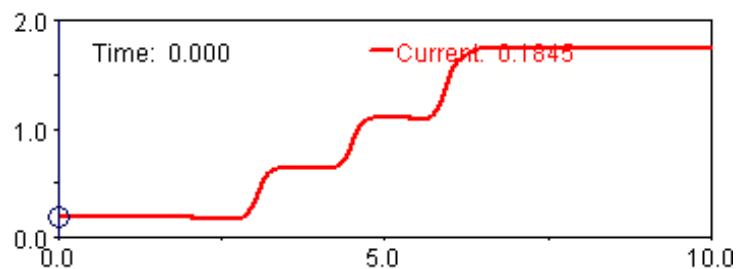
Destacan los picos en los que el pie levanta el paso: los dos primeros, similares (la leve diferencia se debe al balanceo de los pies), mientras que el tercero corresponde a la elevación del paso para alcanzar el escalón. Los pequeños picos intercalados se deben, como se dijo antes, al balanceo de los pies.

En cuanto a la posición del pie izquierdo en el eje X, en la gráfica 28 se puede observar cómo la tercera pendiente ascendente resulta levemente más prolongada que las dos anteriores, ya que corresponde al momento de alargamiento del paso. En la zona llana posterior existe una pequeña irregularidad, producida por el desplazamiento por deslizamiento que se da cuando el robot se para.



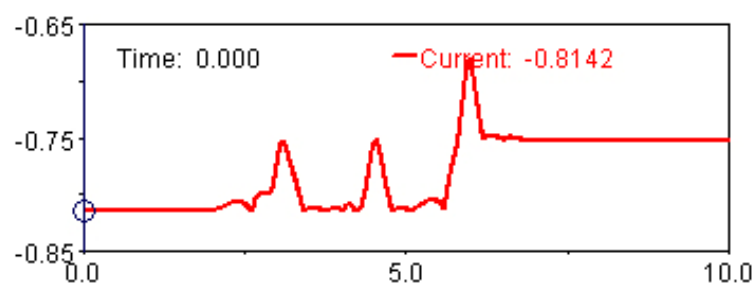
Gráfica 28: Posición pie izquierdo eje X II.

Para concluir, en las gráficas siguientes se analizan los desplazamientos del pie derecho a lo largo de los ejes X e Y. La gráfica 29 refleja, al igual que en el caso del pie izquierdo, el alargamiento del paso en el momento de subir el escalón.



Gráfica 29: Posición pie derecho eje X.

Por su parte, la gráfica 30 permite observar la posición del pie derecho respecto del eje Y. Como era de esperar, aparece destacado el tercer pico, que corresponde al tercer paso que da el robot, durante el cual sube al escalón.



Gráfica 30: Posición pie derecho eje Y.



Capítulo V:

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.

Una vez se ha llegado al final del presente Proyecto, se puede concluir afirmando que se han alcanzado con éxito los objetivos propuestos al comienzo del mismo.

Se han cumplido satisfactoriamente los objetivos principales:

- Se ha propuesto una nueva metodología de diseño para integrar en el robot bípedo PASIBOT un sistema de actuadores que lo capacitan para reproducir los movimientos que puede efectuar la pierna humana. Esta evolución del robot ha sido denominada “robot bípedo MIMBOT”, debido al nuevo comportamiento mimético. Se ha sugerido el diseño del MIMBOT integrando el modelo de PASIBOT original con el sistema de estabilización primario y el modificado, con la inclusión de cuatro actuadores: uno horizontal y otro vertical a cada lado de la cadera, para implementar habilidades miméticas.

El proceso de diseño ha supuesto enfrentarse a una toma de decisiones en busca de la idoneidad del diseño elegido y ha implicado el uso de un buen número de las herramientas que el programa Solid Edge pone a disposición del usuario. El diseño definitivo supondría una modificación de escasa aparatosidad sobre el modelo original de la cadera del robot, lo cual resulta de importancia en términos económicos y conlleva poco impacto sobre la variabilidad del funcionamiento del nuevo modelo con respecto al anterior.

A nivel técnico, se ha llevado a cabo un estudio de la funcionalidad del modelo en busca de interferencias tras el primer diseño, que han derivado en un rediseño de algunas de las piezas del robot cuya modificación no estaba directamente relacionada con la inclusión de los actuadores.

- Además, se ha exportado dicho modelo al programa simulador de mecanismos MSC. Adams, donde se ha procedido a su adecuación e implementación para llevar a cabo estudios sobre su comportamiento bajo distintas condiciones. Se realizaron comprobaciones sobre el funcionamiento teórico de los nuevos actuadores, encaminadas también a abrir nuevas líneas de trabajo que hagan uso de ellos, implementando funciones para los diversos movimientos que se quieran reproducir.

También se ha cumplido con éxito con las metas fijadas a lo largo del trabajo, necesarias para ir avanzando en pos de los objetivos principales.

Se ha proporcionado una variante del nuevo modelo del robot que no contempla la inclusión del actual sistema de transmisión del estabilizador, para el caso en el que se quiera estudiar la influencia de los actuadores sobre la inclinación de los pies para posibles aplicaciones en cuestas.

Asimismo, se ha facilitado un modelo del MIMBOT con el paso cambiado, con el que se podría analizar la influencia que la elección del paso que inicia el movimiento tiene sobre la trayectoria que el robot efectúa.

Se han llevado a cabo aportaciones con las pruebas de amplitud y altura del paso, mediante ejercicios prácticos en los que se observa con claridad la utilidad de los nuevos actuadores aplicados a casos a los que podría verse enfrentado el robot cuando se encuentre en condiciones de desenvolverse eficazmente en un entorno físico real.

Otras conclusiones alcanzadas conciernen a las dificultades encontradas durante la realización de las simulaciones en Adams: aunque las modificaciones centradas en la adición de movimientos que simulan el andar humano cumplen correctamente con su cometido, sigue existiendo un problema relativo a la inestabilidad del caminar del robot. Durante las simulaciones con el modelo libre, se produjeron inclinaciones y deslizamientos de las plantas de los pies durante su apoyo en el suelo, que complicaron la implementación de las funciones de los actuadores. También se apreció una tendencia del robot a caer hacia atrás y giros de su trayectoria hacia los lados debidos al pivotamiento de los pies. Estos inconvenientes están siendo estudiados en otros Proyectos de investigación y, una vez subsanados, permitirán una mejor incorporación e interpretación de las mejoras enfocadas a imitar el caminar humano.

Finalmente, se puede concluir confirmando la plena disponibilidad del nuevo modelo del robot MIMBOT con vistas a posteriores estudios sobre el uso y funcionamiento del sistema de actuadores que intentará reproducir lo más fielmente posible el caminar humano.

5.2. TRABAJOS FUTUROS.

Una vez concluido el trabajo, se puede aconsejar que se sigan las siguientes vías de desarrollo para continuar con la mejora del MIMBOT:

➤ Diseño de una nueva cadera interior.

Se debería efectuar el diseño realista de una nueva cadera interior que disponga de elementos de sujeción para el motor del robot, la batería y el sistema de transmisión y que sea compatible con el rediseño de la cadera propuesto en este Proyecto.

➤ Redistribución de masas.

Se recomienda un estudio de redistribución de masas realista en el robot con el propósito de poder realizar estudios de estabilidad para determinadas condiciones de funcionamiento, intentando evitar los fenómenos de inestabilidad encontrados en los modelos del robot estudiados hasta ahora.

➤ Estudio de la dirección de la trayectoria del robot.

Es conveniente analizar el fenómeno observado de cambio de la dirección que toma el robot al inicio del paso y que guarda probablemente relación con el pivotamiento de los pies, para descubrir sus causas y proponer soluciones que lo eviten.

➤ Implementación de habilidades miméticas.

Se propone la posibilidad de implementar de forma más detallada diferentes movimientos en el MIMBOT con la herramienta MSC. Adams de forma que se analicen sobre un modelo libre metodologías para efectuar variaciones en la altura y amplitud del paso por medio de los actuadores diseñados en este Proyecto.



Capítulo VI:

PRESUPUESTO

6.1. PRESUPUESTO.

Este documento presenta una estimación del presupuesto para la elaboración del Proyecto “Rediseño del robot bípedo MIMBOT para incorporar habilidades miméticas”.

Se han empleado un total de 10 meses desde el inicio del Proyecto, partiendo de la documentación, hasta la defensa final del mismo. A continuación, se especifican las fases del Proyecto junto con el tiempo empleado para su realización y la redacción de la memoria.

1. Planteamiento de los objetivos del PFC (2 semanas)

Esta primera fase consistió en reuniones con el tutor para exponer la conveniencia de realizar este Proyecto, establecer sus objetivos principales y dictar unas pautas iniciales de trabajo.

2. Estudio del estado del arte (3 semanas)

Durante este período, se procedió a la búsqueda y la lectura de documentación existente relativa al tema, en anteriores Proyectos Fin de Carrera, artículos científicos, libros de la biblioteca y páginas web.

3. Introducción al Solid Edge ST (1 semana)

Dado que ya se poseían conocimientos de este programa debido a su aprendizaje a lo largo de la carrera, esta fase se limitó a la realización de varios ejercicios sencillos para recordar el manejo del programa y fue de corta duración.

4. Rediseño del modelo del robot bípedo MIMBOT en Solid Edge ST (10 semanas)

Esta fase es la más importante para la consecución de los objetivos principales del Proyecto, por lo que el tiempo dedicado a ella fue en consonancia. La obtención de varias alternativas al diseño y el deseo de asegurar un modelo fiable antes de su exportación a MSC. Adams prolongó este período.

5. Introducción al programa MSC. Adams (6 semanas)

Ésta fue la primera vez que se trabajó con el programa MSC. Adams, y por ello se quiso llevar a cabo un aprendizaje partiendo desde las nociones básicas, hasta la realización de ejercicios y simulaciones no relacionados directamente con el Proyecto, pero que fueron de gran ayuda para familiarizarse con el programa. Se siguieron manuales de usuario del programa.

6. Adecuación e implementación del modelo en MSC. Adams (2 semanas)

Esta fase supuso la obtención de modelos preparados para las simulaciones en MSC. Adams, incluyendo materiales y denominación de los elementos, juntas, actuadores y contactos.

7. Simulación en MSC. Adams (10 semanas)

En esta fase se llevaron a cabo todas las simulaciones contempladas en los objetivos del Proyecto, tanto sobre el modelo colgado como sobre el libre. Se ha calculado que se realizaron más de quinientas simulaciones.

8. Redacción de la memoria del PFC (6 semanas)

Esta última fase comprendió la redacción de la memoria del Proyecto.

COSTES.

El desarrollo de este Proyecto conlleva una serie de costes económicos estimados, que se desglosan a continuación, en la tabla 2. Estos costes son asignados a la labor de diseño los modelos del robot bípedo MIMBOT y su posterior simulación en MSC. Adams durante los tiempos estipulados anteriormente.

PERSONAL			
Descripción	Horas	Coste por hora (€/h)	Coste imputable (€)
Diseño en Solid Edge ST	120	75	9000
Simulación en MSC. Adams	140	75	10500
Redacción	100	30	3000
EQUIPO ¹			
Descripción	Coste (€)		Coste imputable (€) ²
Ordenador	1200		200
Impresora multifunción	90		15
SOFTWARE ³			
Programa	Coste licencia por año (€/año)		Coste imputable (€)
Licencia Solid Edge ST	8000		800
Licencia MSC. Adams	15000		1500

¹ La depreciación del equipo se realiza en 60 meses, dedicándole un uso máximo de 10 meses.

² Precio del equipo según el uso en función de la depreciación.

³ El software tiene una amortización de 1/10.

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS	
Descripción	Coste imputable (€)
Gastos de material de oficina e impresión del documentos	250
TOTAL	25265 €

Tabla 2. Desarrollo de costes del Proyecto.

Para la realización de este PFC se necesita una estación de trabajo que disponga de los programas Solid Edge ST y MSC. Adams. El coste de la estación de trabajo se estima en torno a los 1200 €. A dicho coste se le debe añadir el precio de la impresora multifunción, con un valor de 90 €. A todo el equipo se le asigna una depreciación de 60 meses, dedicándole un total de 10 meses al uso de dichos equipos.

Al coste del equipo se le debe añadir el coste del mantenimiento de la licencia del Solid Edge ST y del MSC. Adams, que tienen un coste de 8000 y 15000 euros, respectivamente. A ambos programas se le presupone una amortización de 1/10.

Durante los 10 meses que se han dedicado a la realización del Proyecto, se ha dedicado un tiempo total de 120 horas a la etapa de diseño, 140 horas a la de simulación y 80 horas a la redacción de la memoria completa. El salario de un ingeniero con las facultades para realizar el diseño y la simulación con ambos programas es de 75 euros por hora, mientras que para la redacción de la memoria el coste de un ingeniero es de 30 euros por hora.

Por último, el coste imputable a los gastos de oficina y a la impresión de las copias necesarias de esta memoria tiene un valor de 250 €.

En total, la suma de los costes económicos estimados para la realización del proyecto resulta una cantidad de **25625 €**.



Capítulo VII:

BIBLIOGRAFÍA

7.1. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Pérez Caballero, Javier. “Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo Pasibot”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [2] Jiménez Crespo, José Manuel. “Análisis y simulación del robot bípedo Pasibot”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2011.
- [3] Gallardo Mielgo, Jorge. “Estudio de la implementación de habilidades a un robot bípedo”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2008.
- [4] Espantoso Miranda, Víctor. “Modelado y simulación del robot Pasibot. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [5] Redondo Perales, Alejandro. “Análisis y simulación del comportamiento del robot bípedo Pasibot”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [6] Pérez Perdiguero, Juan Manuel. “Desarrollo e implementación de la aplicación informática Mimbot 5.0”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2010.
- [7] Martínez Alberto, David. “Estudio del deslizamiento del robot Pasibot”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2011.
- [8] Apuntes de la asignatura *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, de la I.T.I. Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid: 2007.
- [9] M.E. Escobar., H. Rubio., J.C. García-Prada., and M. Ceccarelli., “Sistema de Estabilización del Robot Pasibot” XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real. España: 2010.

7.2. REFERENCIAS WEB.

[9] Información MSC. Adams.

<http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>

(Última visita: 1-11-2011)

[10] Manual Adams/View.

http://www.am.chalmers.se/~anbo/mekfk/view_gs.pdf

(Última visita: 8-11-2011)

[11] Foros Solid Edge.

<http://www.solidedge-es.com/index.php>

(Última visita: 28-8-2011)

[12] Wikipedia.

<http://es.wikipedia.org>

(Última visita: 14-10-2011)

[13] Wordreference.

<http://www.wordreference.com/es/>

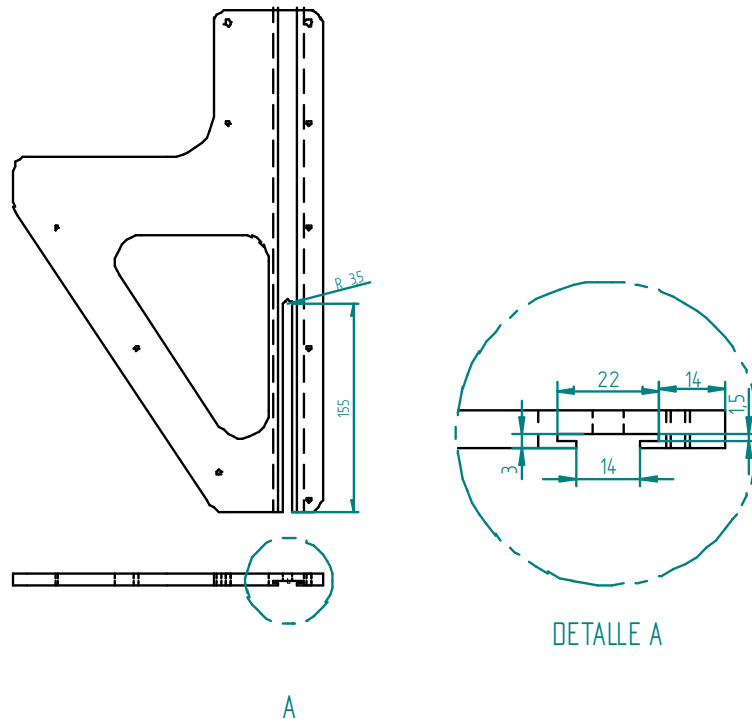
(Última visita: 11-11-2011)



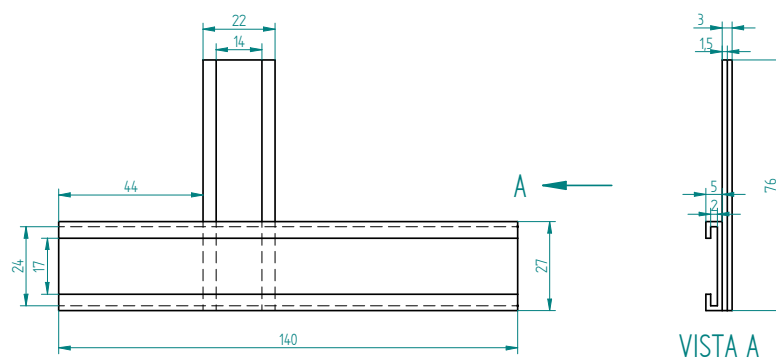
ANEXOS

ANEXO A: PLANOS DE LAS PIEZAS.

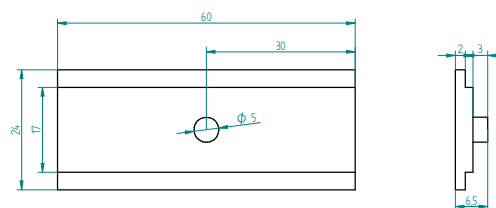
CADERA EXTERIOR



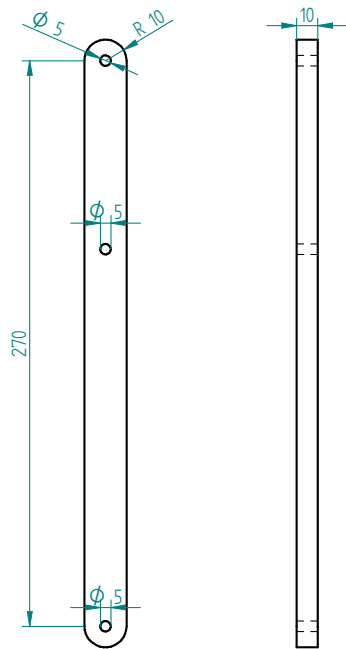
DESLIZADERA EN T



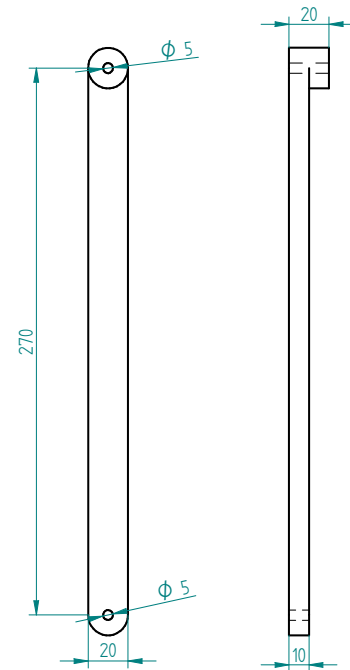
ACTUADOR



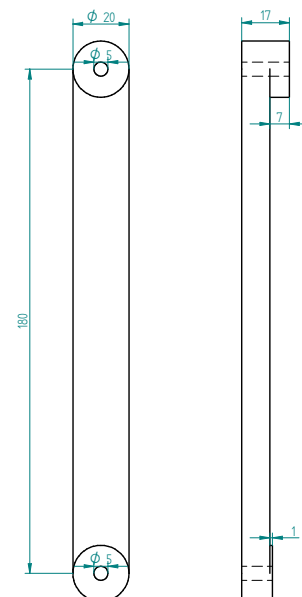
FÉMUR



CONTRAFÉMUR



TENDÓN INFERIOR





ANEXO B

MANUAL BASICO DE APRENDIZAJE DEL SOFTWARE MSC.ADAMS:

1. INTRODUCCIÓN.

En el siguiente manual se va a proceder a explicar de una forma básica el funcionamiento del programa de simulación MSC.ADAMS 2005 View, la interfaz, las posibilidades de diseño, de simulación, animación y obtención de resultados, todo ello acompañado de ejemplos explicativos.

El programa MSC.ADAMS View es un programa de simulación en tres dimensiones orientado hacia la simulación de mecanismos. Su mayor virtud es, una vez simulado el modelo, la obtención directa de todo tipo de resultados, de una manera directa y muy fiable.

Una vez iniciado el programa MSC.ADAMS view, aparecerá el siguiente menú de inicio:

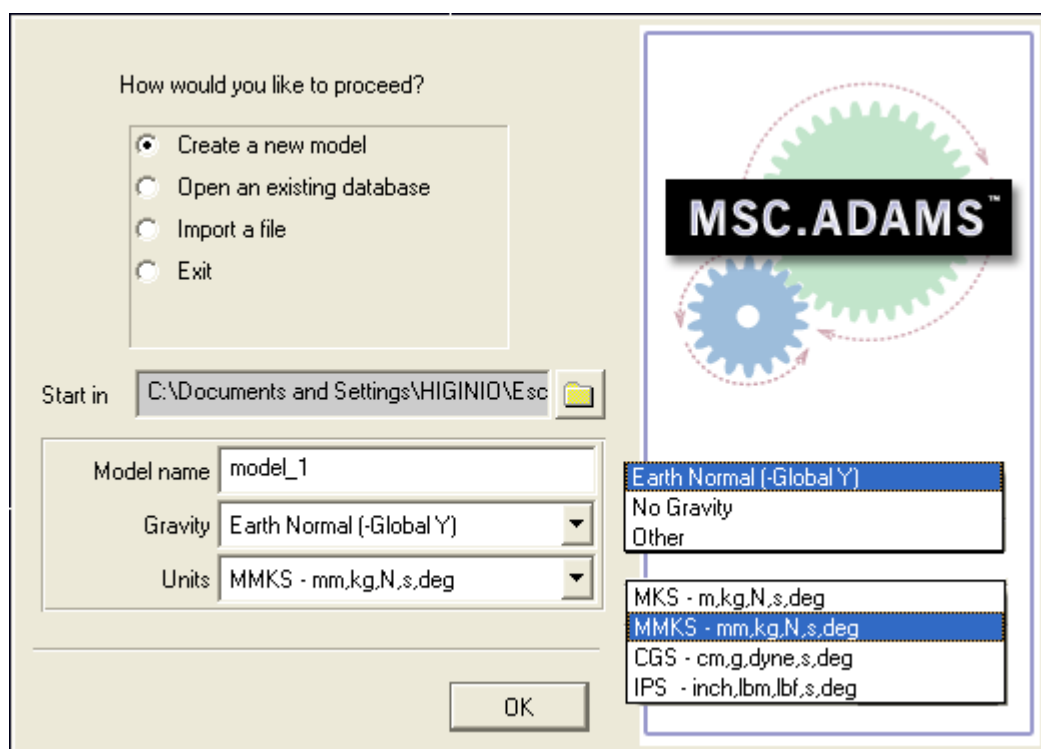


Figura 3.1.1 - Menú de inicio.

En ella se podrá definir iniciar un nuevo modelo, abrir una base de datos ya existente, es decir, abrir un modelo guardado anteriormente, importar un archivo o salir del programa. Además se podrá definir la carpeta en la cuál se guardarán por defecto las bases de datos creadas. Se podrá también definir el nombre del archivo, si se desea dar gravedad, por defecto la de la Tierra, así como el sistema de unidades, muy importante para diseñar y para la obtención de resultados, MMKS por defecto.

2. CONTROLES BÁSICOS.

Si se inicia un modelo nuevo, aparecerá el espacio de trabajo, con la barra de tareas básica (figura 3.2.1):

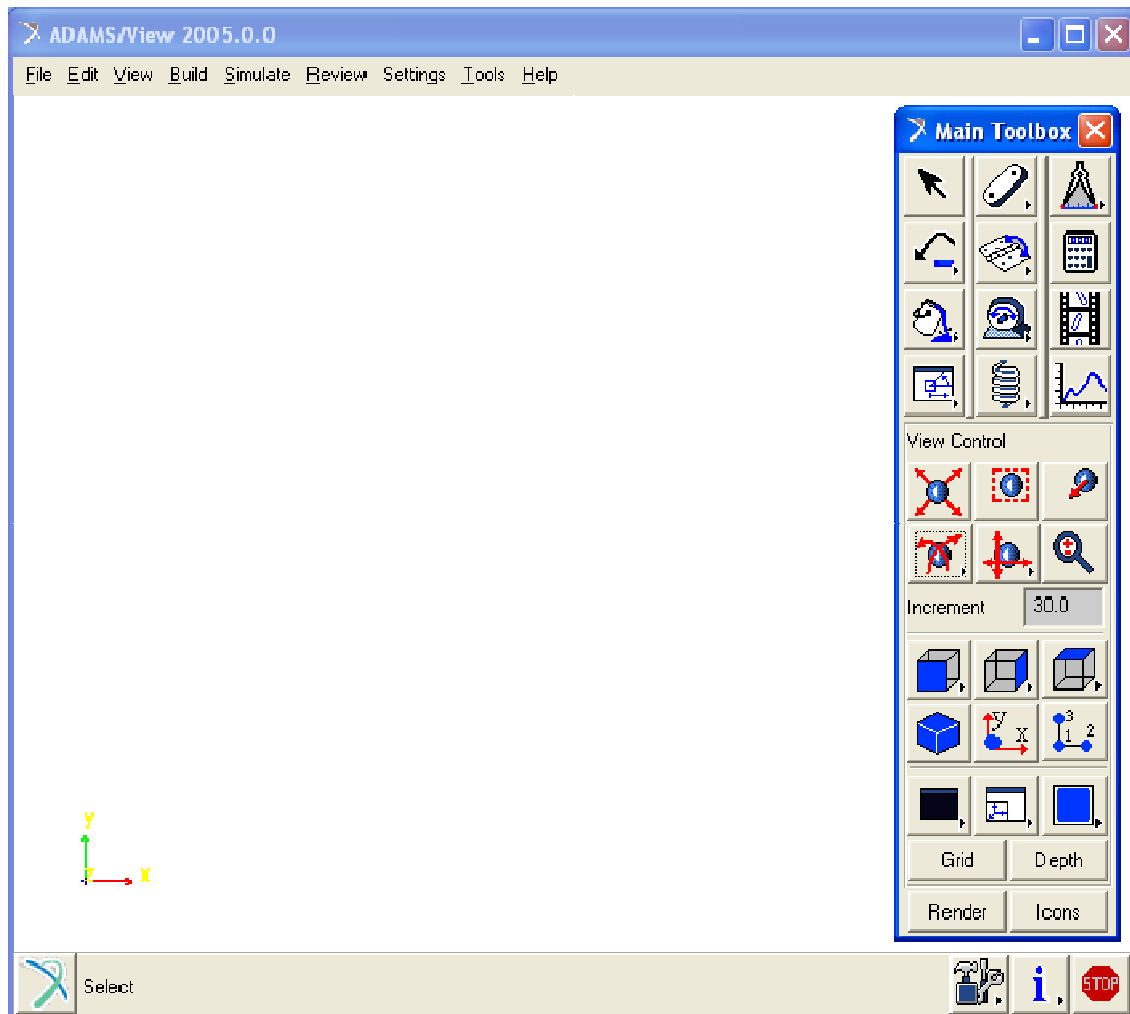
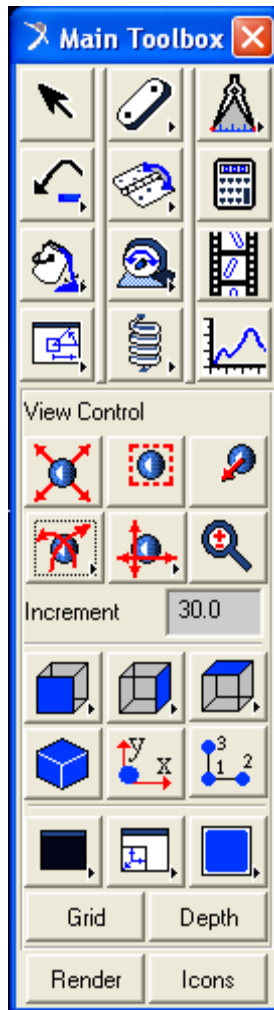


Figura 3.2.1 - Espacio de trabajo y barra de tareas.

En la parte superior aparecen las opciones clásicas de FILE, para guardar, cargar, exportar, etc; SETTINGS, donde se podrán configurar las unidades de trabajo, modificar la gravedad, la malla para diseñar y otras opciones y HELP, donde se podrán hacer consultas de sobre dudas. En EDIT, VIEW, BUILD, SIMULATE, REVIEW y TOOLS se podrán acceder a ellos de una forma básica a través de la barra de tareas ó del botón derecho del ratón.

El espacio de trabajo por defecto está situado en el plano X-Y, en $Z=0$, con el eje Z saliendo del plano de trabajo. La gravedad sigue la dirección del eje Y en sentido negativo.

A continuación se procederá a explicar la barra de tareas con sus funciones elementales:



Ésta es la barra de tareas que aparece por defecto, que es la

misma que si se pulsa el cursor:



Las opciones para generar diferentes vistas del modelo son:



Con las primeras opciones, de izquierda a derecha y de arriba a abajo se puede encuadrar, dar zoom a una determinada zona, moverse a un punto determinado, girar o rotar en el plano, desplazarse en el plano y dar zoom. Hay que aclarar que los iconos con una flecha en la parte inferior derecha son desplegados con más opciones.

Con las segundas se podrá variar el plano de trabajo, frontal o posterior, izquierda o derecha, superior o inferior o en isométrico. Además se podrá situar el plano de trabajo en un cuerpo según sus ejes X-Y ó alinear el plano por tres puntos.



Con estos tres iconos se podrá modificar el color del fondo de trabajo, dividir la pantalla o dar más opciones.

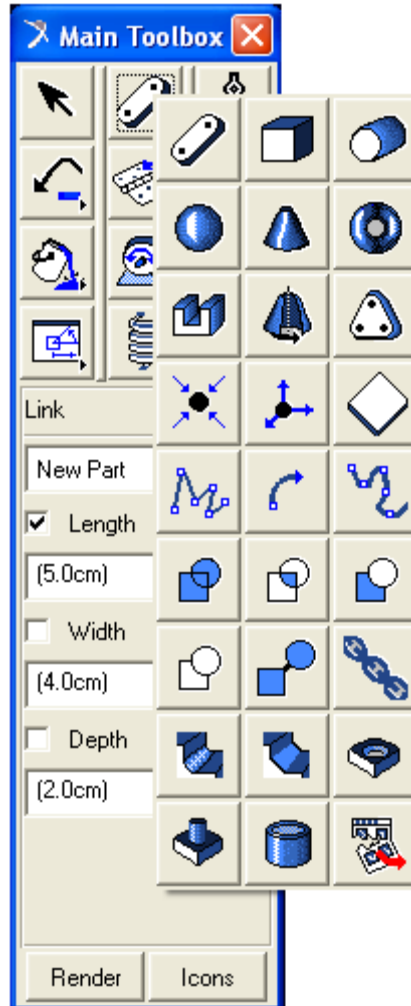
Figura 3.2.2 -
Barra de tareas.

Por último, con los cuatro últimos iconos se podrán realizar las siguientes funciones:

- GRID: Se activa o desactiva la malla de trabajo.
- DEPTH: Se cambia la perspectiva de la profundidad.
- RENDER: Se renderizan los elementos.
- ICONS: Rehacen visibles o no los iconos en los elementos.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

Para diseñar los elementos se utilizara el siguiente desplegable:



Las operaciones que se muestran a continuación son las básicas para el diseño en MSC.ADAMS View. Se dividiran en cuatro grupos, y se explicaran los más importantes. En primer lugar están las operaciones de diseño y construcción (puntos, líneas y marcadores). En segundo lugar las operaciones básicas de diseño de sólidos rígidos; en tercer lugar las operaciones booleanas para combinar piezas y por último las operaciones para modificar piezas. Hay que destacar, que existe un menú de diseño que se puede dejar fijo

si se pulsa el icono

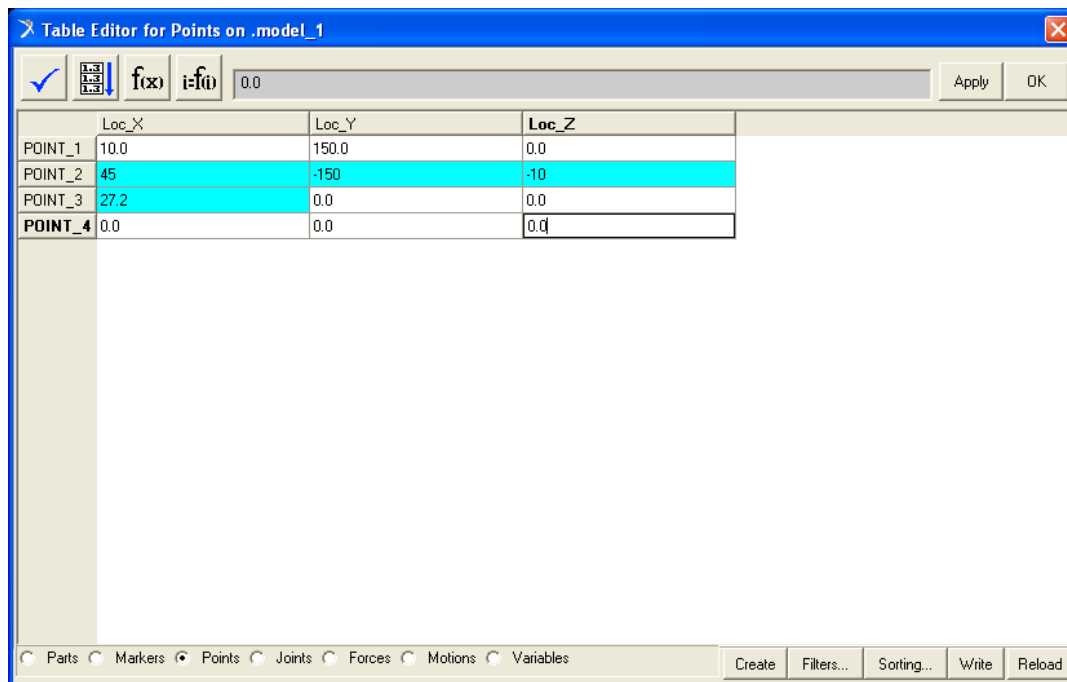


siendo el menú siguiente:



Figura 3.3.1 - Barra de tareas de diseño.

Figura 3.3.2 - Editor de Puntos “Point Table”.



Los puntos aparecen representados en la figura 3.3.3:

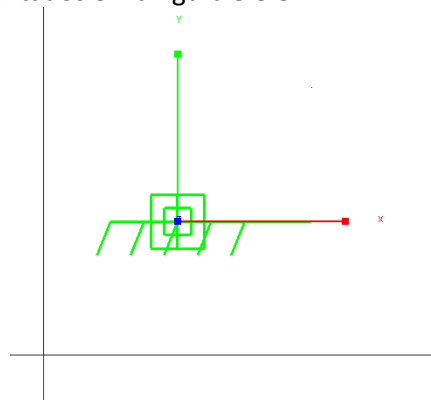


Figura 3.3.3 - Punto añadido al suelo “Ground”.

A continuación se explicarán los marcadores (MARKERS). Los marcadores son puntos de referencia que aparecen en las piezas, normalmente en su centro de masas (Marker: cm) y en sus puntos más significativos, como sus extremos. Son utilizados principalmente para dar posición a una pieza nueva respecto de otra que ya existe, para realizar medidas, para posicionar juntas, motores y para desplazar o rotar piezas utilizándolos como referencia.

Se pueden añadir marcadores utilizando el siguiente icono:



Los marcadores por defecto se añaden al suelo, por que si se quieren añadir a piezas primero se debe cambiar en el desplegable de “Add to Ground” a “Add to Part”.

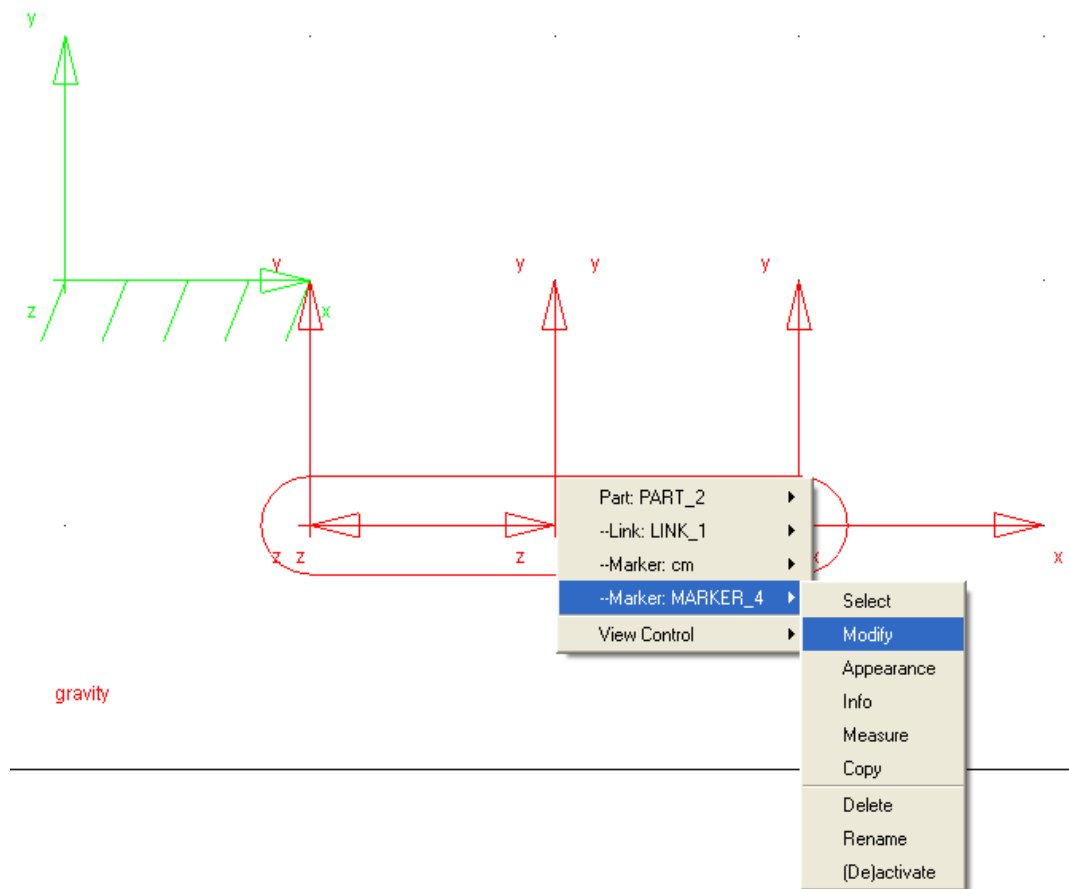
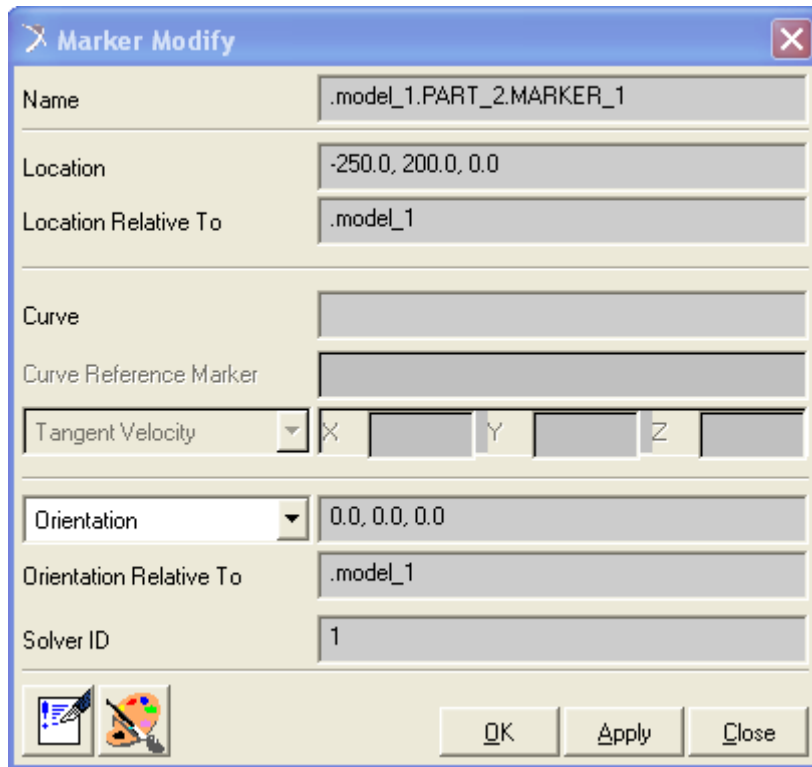


Figura 3.3.4 - MARKERS.

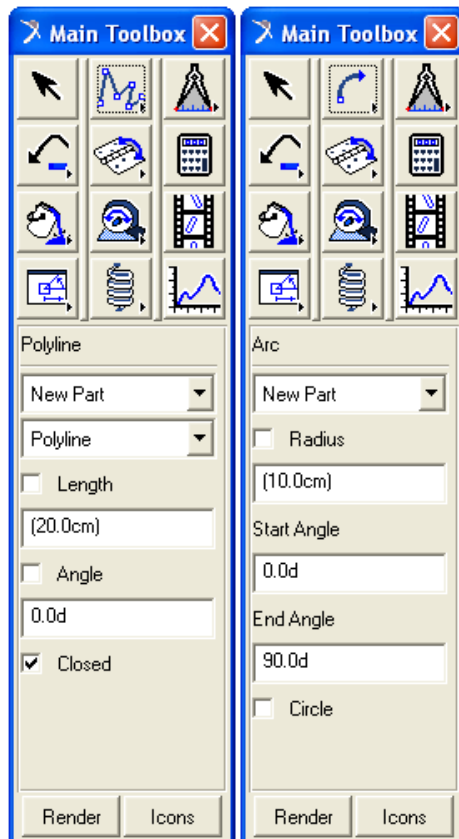
En la figura 3.3.4 aparecen un marcador en el suelo (verde) y un eslabón con sus tres markers más representativos. También se aprovechará a explicar cómo modificarlos. Si se pincha con el botón derecho en una zona del espacio de trabajo, aparecerá un desplegable con los elementos más cercanos, en éste caso PART_2 (elemento 2). Dentro de PART_2 aparece LINK_1, refiriéndose al eslabón y MARKER_4, el cuál ha sido añadido previamente. En MARKER_4 si se pincha en modificar (modify) aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



Donde se podrá reubicar dando las nuevas coordenadas ó el giro respecto a los ejes que se quiera. Reseñar que las coordenadas son GLOBALES, no locales respecto al elemento.

Figura 3.3.5 - Cuadro de diálogo de MARKERS.

Por último se explicará brevemente las líneas:



Las líneas carecen de masa, y se pueden utilizar, por ejemplo, para generar posteriormente extrusiones. La primera se utiliza para líneas rectas, la segunda para generar arcos y la tercera para líneas curvas. Se generará la línea dándole la forma que se desee utilizando el botón izquierdo del ratón, finalizando la operación pulsando el botón derecho. Una aplicación importante, y que también se utiliza en otros muchos elementos y piezas, es la posibilidad de preestablecer las dimensiones.

Figura 3.3.6 - Tipos de líneas.

3.1. DISEÑO DE SÓLIDOS.

Los sólidos que podemos diseñar son los siguientes:



Como en el caso de las líneas, se podrán preestablecer las dimensiones de los sólidos. En caso de que no se pueda establecer la orientación durante el diseño del sólido, ésta será siempre perpendicular a la malla y situada sobre ella en el caso de que esté activada, y perpendicular a la vista del espacio de trabajo en el caso de que esté desactivada.

Se explicarán a continuación:



PARALELEPÍPEDO: Primero se dimensiona la base y se extruye (profundidad “deep”). Se extruye sólo en una dirección.



CILINDRO: Se dimensiona de perfil y se le da la orientación deseada. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESFERA: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



CONO: Se dimensiona de perfil. Es recomendable predefinir sus dimensiones. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



TOROIDE: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESLABÓN: Se define su longitud entre centros de redondeo de los extremos. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Tiene las esquinas redondeadas. Se define su forma mediante una línea con el botón izquierdo del ratón, cuando se desee finalizar se pulsará el botón derecho. La placa se define entre los centros de redondeo de las esquinas. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



EXTRUSIÓN: Se define la forma mediante una línea ya creada o definiéndola con el ratón. Se extruye sólo en una dirección, por lo que debe ser definida.



SOLIDO DE REVOLUCIÓN: Se define el eje de revolución y el perfil de revolución. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Se define como el paralelepípedo, pero ni se extruye ni tiene masa.

3.2. OPERACIONES BOOLEANAS.

Las operaciones booleanas se utilizan para combinar sólidos rígidos. A continuación se explicarán las más importantes:



UNIR: Fusiona dos sólidos de manera que se transforma en uno sólo. Las dimensiones de los sólidos que lo componen no se pueden modificar.



PEGAR: Une dos sólidos manteniendo las posiciones uno respecto de otro. Las dimensiones de los sólidos sí se pueden modificar.



INTERSECTAR: Al aplicar esta función el sólido resultante es la intersección de los dos sólidos definidos.



CORTAR: El sólido elegido en primer lugar es cortado por el elegido en segundo lugar, desapareciendo entonces el segundo sólido.

3.3. MODIFICACIÓN DE SÓLIDOS.

Las operaciones siguientes sirven para modificar sólidos rígidos:



CHAFLÁN: Genera un chaflán de 45° con la anchura especificada. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



REDONDEO: Genera un redondeo con el radio especificado. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



AGUJERO: Genera un agujero de radio y profundidad especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



MACHO: Genera un macho a modo de tornillo de radio y longitud especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



VACIADO: Genera un vaciado en las caras seleccionadas con una anchura de pared especificada.

Los sólidos diseñados por defecto no tendrán contacto entre sí, lo cuál es beneficioso a la hora de diseñar en 2-D, ya que no existirá interferencia entre las piezas.

3.4. MODIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES INICIALES DE LOS SÓLIDOS:

Los sólidos diseñados pueden ser modificados normalmente tanto en posición como en dimensiones, pero como se pueda hacer depende de cómo halla sido diseñado.

La posición y las dimensiones pueden ser modificada de de dos maneras, en función de si han sido referidos a puntos o no:

- Si han sido añadidos a puntos la posición y las dimensiones deberán ser modificadas reubicando los puntos mediante “Point Table” como ya se explico anteriormente.
- Si no han sido referido a puntos la posición y las dimensiones se modifican de las siguientes maneras.

POSICIÓN:

La posición se puede modificar pinchando dos veces con el botón izquierdo del ratón o con el desplegable del botón derecho indicando la parte (PART) y Modify (figura 3.3.4.1):

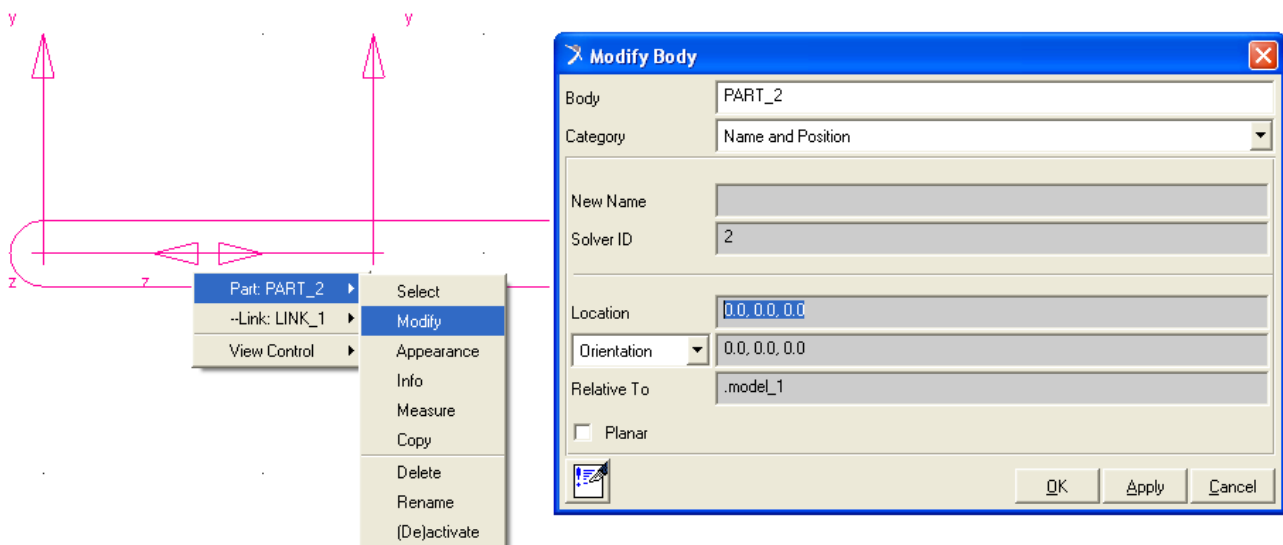
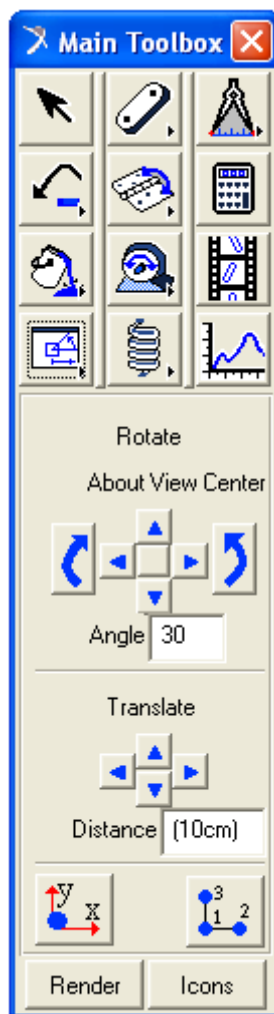



Figura 3.3.4.1 - Modificación de la posición.

en “Category” se indica “Name and Position” y se posiciona el centro de masas de la pieza en “Location” teniendo en cuenta de que son coordenadas LOCALES. Además se podrá variar la orientación del sólido en “Orientation”.

Otra forma es utilizando los siguientes iconos:



Si se pincha en la  barra de tareas se transforma en la que aparece a la izquierda. Si se selecciona directamente el sólido que queremos con el cursor se podrá modificar su posición con las opciones que aparecen en la imagen.

Si se abre el desplegable del icono anterior aparecen las siguientes opciones:

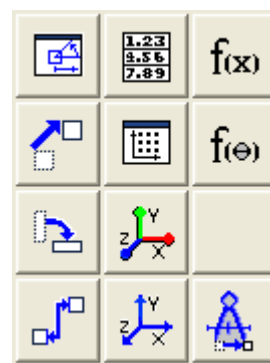


Figura 3.3.4.2 - Posición de

los sólidos

De las opciones anteriores destacan las siguientes:



TRASLACIÓN: Traslada un sólido desde una posición a otra. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ROTACIÓN: Gira un sólido un ángulo prefijado según un eje especificado. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ALINEACIÓN: Alinea la cara elegida de un sólido respecto a otra cara seleccionada de otro.

DIMENSIONES:

Se modifican con el desplegable del botón derecho e indicando dentro de PART el sólido:

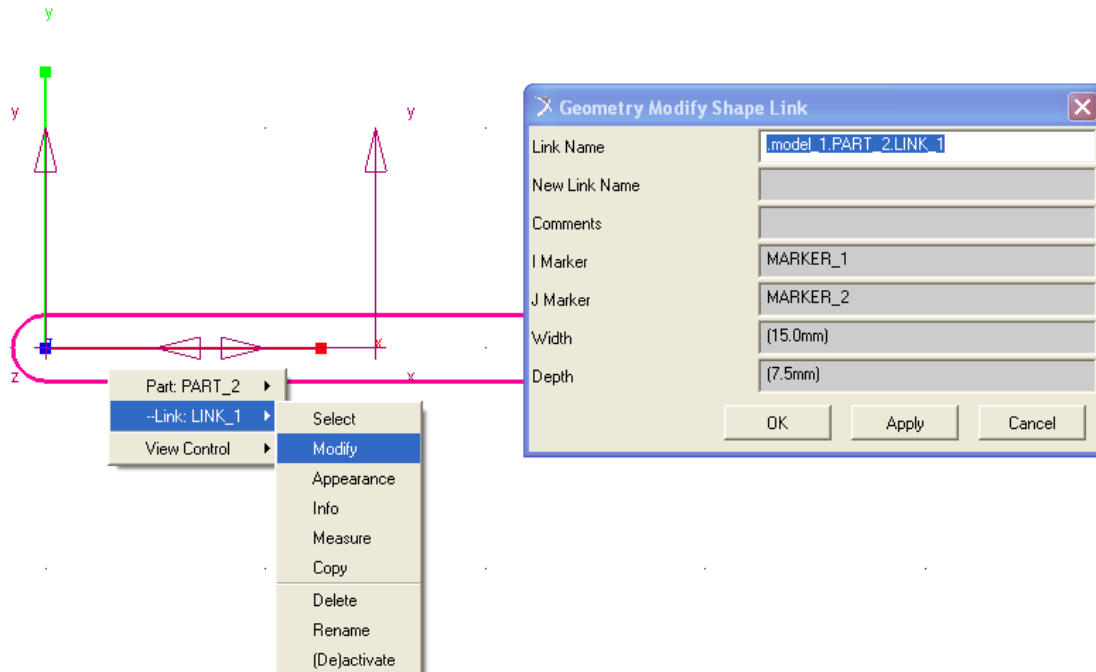


Figura 3.3.4.3 - Modificación de dimensiones.

En ocasiones no se pueden modificar todas las dimensiones, por lo que se eliminará el sólido y se dimensionará de nuevo. Para eliminar un sólido se puede realizar seleccionándolo y pulsando “Ctrl + X” ó con el desplegable del botón derecho y en “Delete”. Si se quieren eliminar varios sólidos se pueden seleccionar utilizando la tecla Ctrl y seleccionandolos con el ratón y utilizando “Delete” del menú “Edit”

Los color de los sólidos puede ser modificado utilizando el icono desplegable



Durante el diseño siempre se podrá deshacer una operación errónea con el icono



3.5. DISEÑO DE JUNTAS, ACTUADORES Y FUERZAS.

Una vez diseñados los sólidos y determinado su posición se procederá a aplicar las juntas y restricciones de movimiento para que el mecanismo se comporte como se desee.

JUNTAS:

En la barra de tareas se dispone de las siguientes opciones:

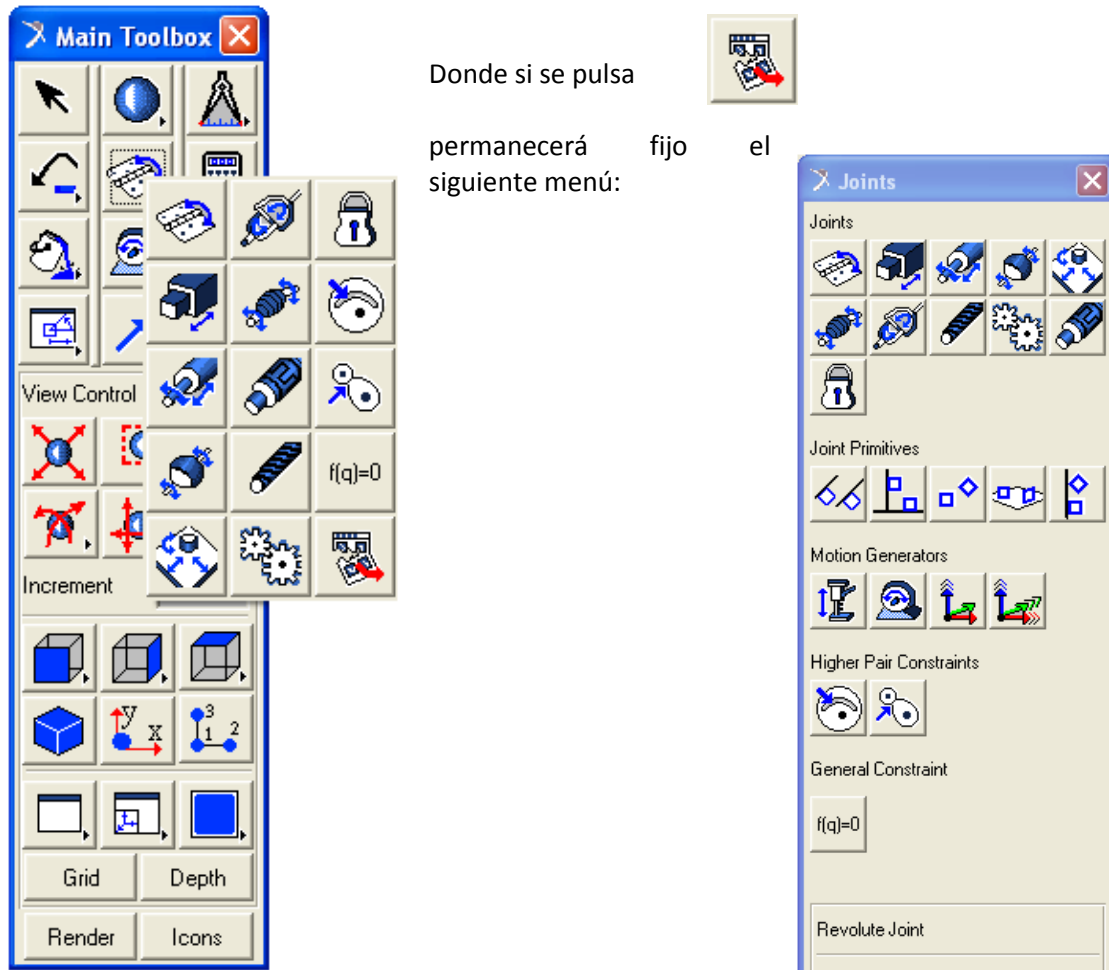


Figura 3.3.5.1 - Diseño de Juntas.

Para el diseño de juntas en principio se dejará el menú de construcción tal y como viene por defecto, es decir, dos cuerpos y una localización. La manera de situarlas es elegir con el ratón los sólidos, o un sólido y el suelo (uno a uno) y por último la localización. En ocasiones, debido al número de sólidos, markers, puntos, etc., que hay en una determinada zona se hace difícil elegir lo que se desea, por lo que en esos casos, una vez elegida la junta se pulsará con el botón derecho en la zona donde se quiere situar y aparecerá un cuadro de diálogo como el de la página siguiente:

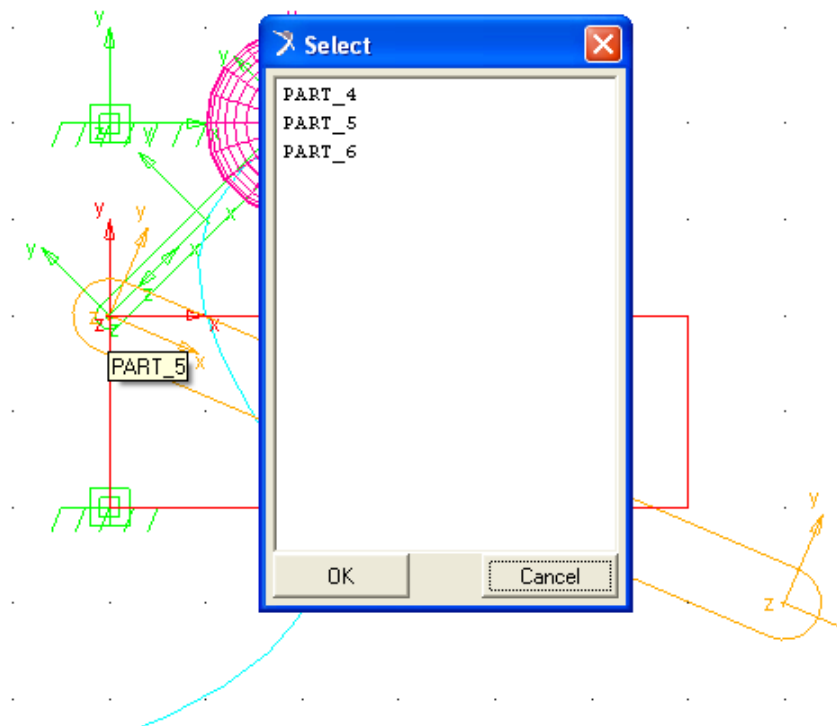


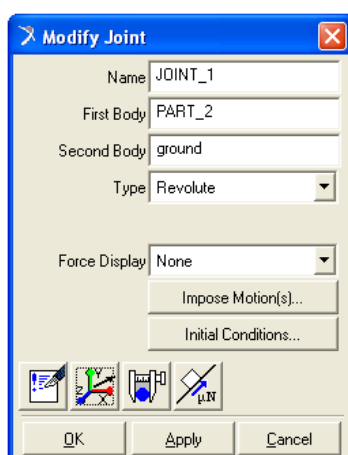
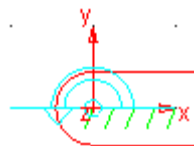
Figura 3.3.5.2 - Selección de Elementos.

donde se podrá seleccionar los sólidos ó elementos de diseño si procediese.

De todas las juntas y restricciones se destacan las siguientes:



JUNTA DE ROTACIÓN:



Restringe el totalmente el movimiento de traslación y la rotación en dos direcciones, permitiendo por tanto la rotación en una sola dirección. La dirección de rotación es, por defecto, normal a la malla, si está activada, o perpendicular a la vista seleccionada en ese momento si está desactivada. Si se desea modificar pulsaremos con el botón derecho en modificar y aparecerá el siguiente menú:

En este menú se podrá redefinir los sólidos que componen la junta, el tipo de junta, si deseamos aplicar una fuerza, realizar medidas, desplazar o girarla o incluso darle fuerza de rozamiento.

Figura 3.3.5.3 – Juntas.

os menús de desplazamientos y de fuerzas de rozamiento son:

El menú de movimientos es el siguiente:

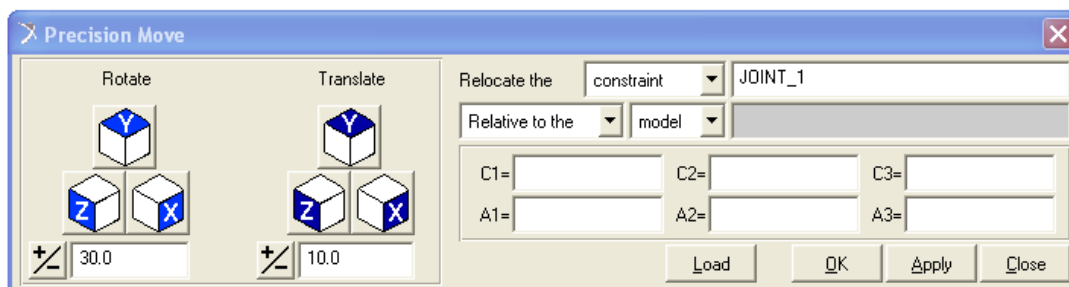
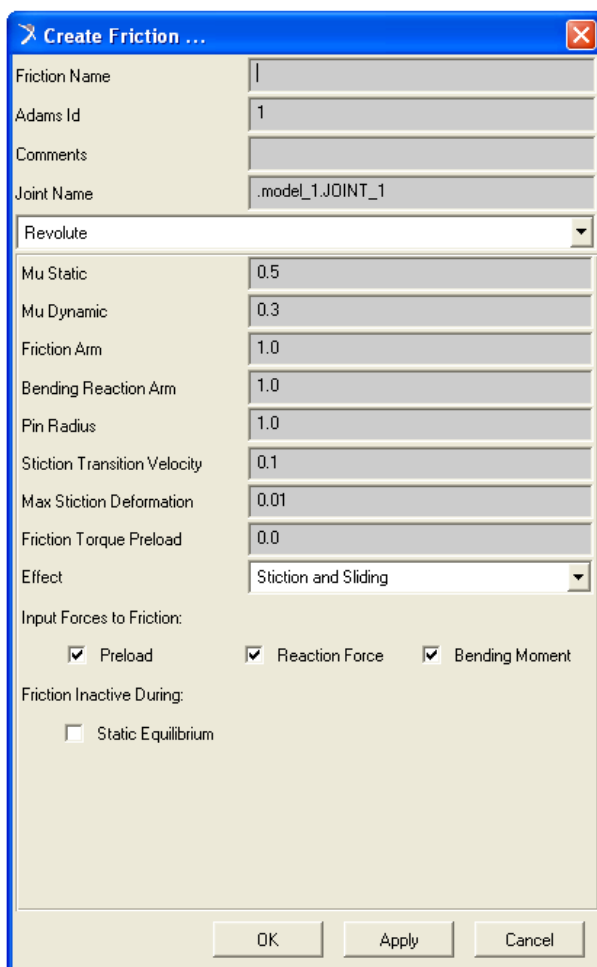


Figura 3.3.5.4 - Menú de movimientos de precisión de juntas.

La principal aplicación de éste menú es la posibilidad de girar juntas en las tres direcciones del plano cuando la dirección especificada no es válida para el diseño.

El menú de fuerzas de rozamiento es el siguiente:

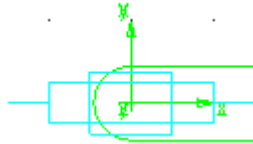


Por defecto las juntas son ideales, no tienen rozamiento, pero éste se puede definir de la forma que se desee.

Figura 3.3.5.5 - Fuerzas de rozamiento.



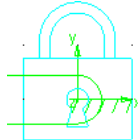
JUNTA DE TRASLACIÓN:



Restringe el movimiento de tal manera que sólo se permite la traslación en una dirección. La dirección de movimiento, una vez seleccionados los sólidos (o el suelo) debe ser especificada. Los menús son iguales que el caso anterior.



JUNTA FIJA:



Restringe el movimiento de tal manera que anula todos los grados de libertad de un sólido respecto de otro o de un sólido respecto al suelo.

Es importante entender que a la hora de diseñar juntas los sólidos no tienen por qué estar en contacto. La junta si ha sido diseñada correctamente no necesita que las piezas estén físicamente en contacto.

ACTUADORES:

Los actuadores generan movimiento en los sólidos rígidos. Son los siguientes:



MOTOR LINEAL:

Se debe aplicar en una junta de traslación ó cilíndrica. Genera movimiento lineal en una dirección que debemos especificar. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



MOTOR ROTATIVO:

Se debe aplicar en una junta de rotación ó esférica. Genera movimiento angular en la dirección de la junta. La velocidad angular debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



ACTUADOR LINEAL DE UNA DIRECCIÓN:

Se especifica por defecto entre dos sólidos, o un sólido y el suelo, y con una dirección. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



ACTUADOR:

Se especifica entre dos sólidos y la localización. Una vez situada aparece un cuadro de diálogo (figura 3.3.5.6) en el que se define el movimiento del actuador.

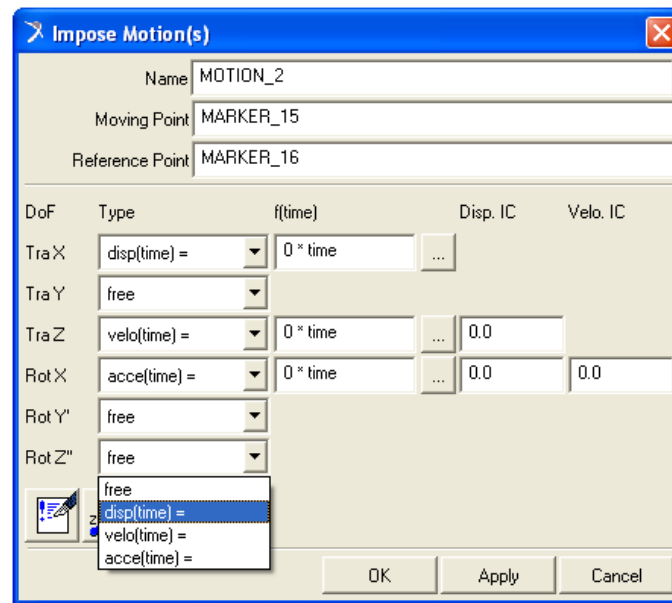
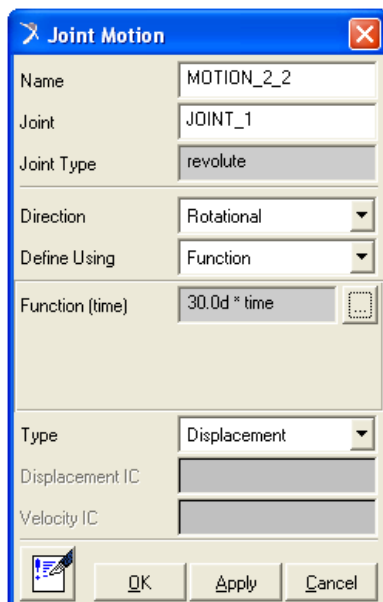


Figura 3.3.5.6 - Cuadro de Diálogo de actuadores.

En él se podrá especificar el movimiento de los 6 grados de libertad, si son libres, si tienen aceleración, etc.

En ocasiones hay que especificar que los actuadores solo generen movimiento durante un intervalo de tiempo. Esto se puede definir de la siguiente manera:

Lo primero que hay que hacer es pinchar en el actuador y modificarlo:



En el menú del actuador se puede ver dónde está aplicada, el tipo, la dirección, la función de movimiento y si esta es de desplazamiento, velocidad ó aceleración. Por defecto son de traslación, y dependen del tiempo. Si se desea modificar la función para variar el movimiento se puede hacer directamente en el cuadro o pinchar en


de la  Apareciendo el constructor de funciones siguiente página:

Figura 3.3.5.7 - Menú de Juntas.

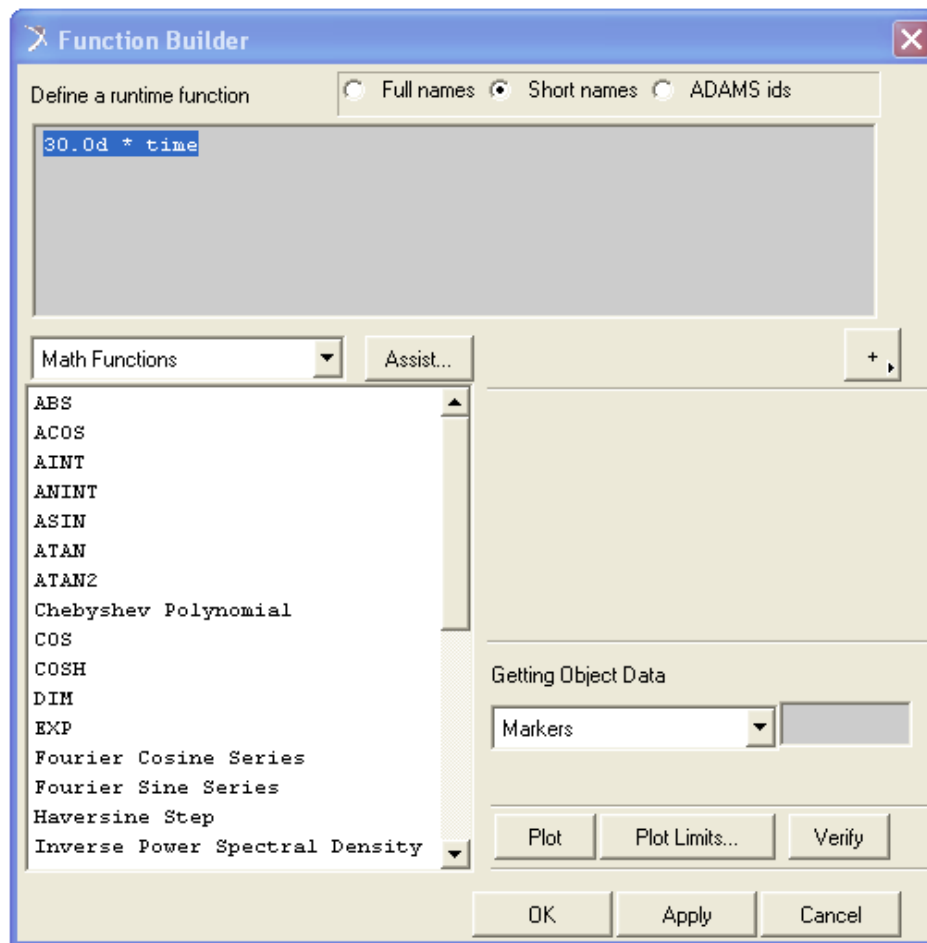


Figura 3.3.5.8 - Constructor de funciones.

En el constructor de funciones (figura 3.3.5.8) se puede ver la función “30.0d * time” donde “d” se refiere a los grados y “time” al tiempo. Si se quiere definir para que el motor solo actúe en un intervalo se utilizará la función “IF”:

IF(time-A:B,C,D) donde:

- A: tiempo para el cuál está definida la función
- B: función que debe realizar antes del tiempo A
- C: función que debe realizar durante el tiempo A
- D: función que debe realizar después del tiempo A

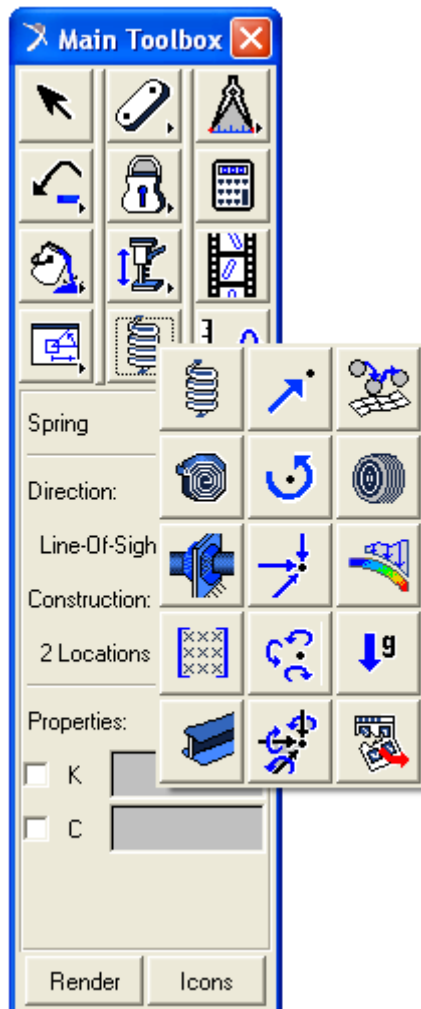
Ejemplo: si se desea que sólo actúe la función de desplazamiento “360d*time” en el intervalo (2 , 5.5) se escribirá:

if(time-2:0,0, 360d*(time-2)) - if(time-5.5:0,0, 360d*(time-5.5))

El motivo de escribir la segunda función restando es que debe contrarrestar la primera para que solo actúe en el intervalo especificado.

FUERZAS:

Además de los actuadores, podemos aplicar fuerzas a los sólidos para que se comporten también de una determinada forma. Las fuerzas se aplicarán con el siguiente desplegable:



Se comentará brevemente los más comunes:



Genera una fuerza lineal en un cuerpo en una dirección indicada.



Genera un par de giro en un cuerpo en una dirección dada.



Genera una fuerza de amortiguamiento lineal entre dos sólidos



Genera un par de amortiguamiento entre dos sólidos.



Genera una fuerza extraordinaria, como la gravedad, pero en la dirección que se desee

Figura 3.3.5.9 - Menú de Fuerzas.

Una aplicación importantísima es la capacidad de dar contacto:



El contacto se genera entre dos sólidos con el cuadro de diálogo siguiente (figura 3.3.5.10):

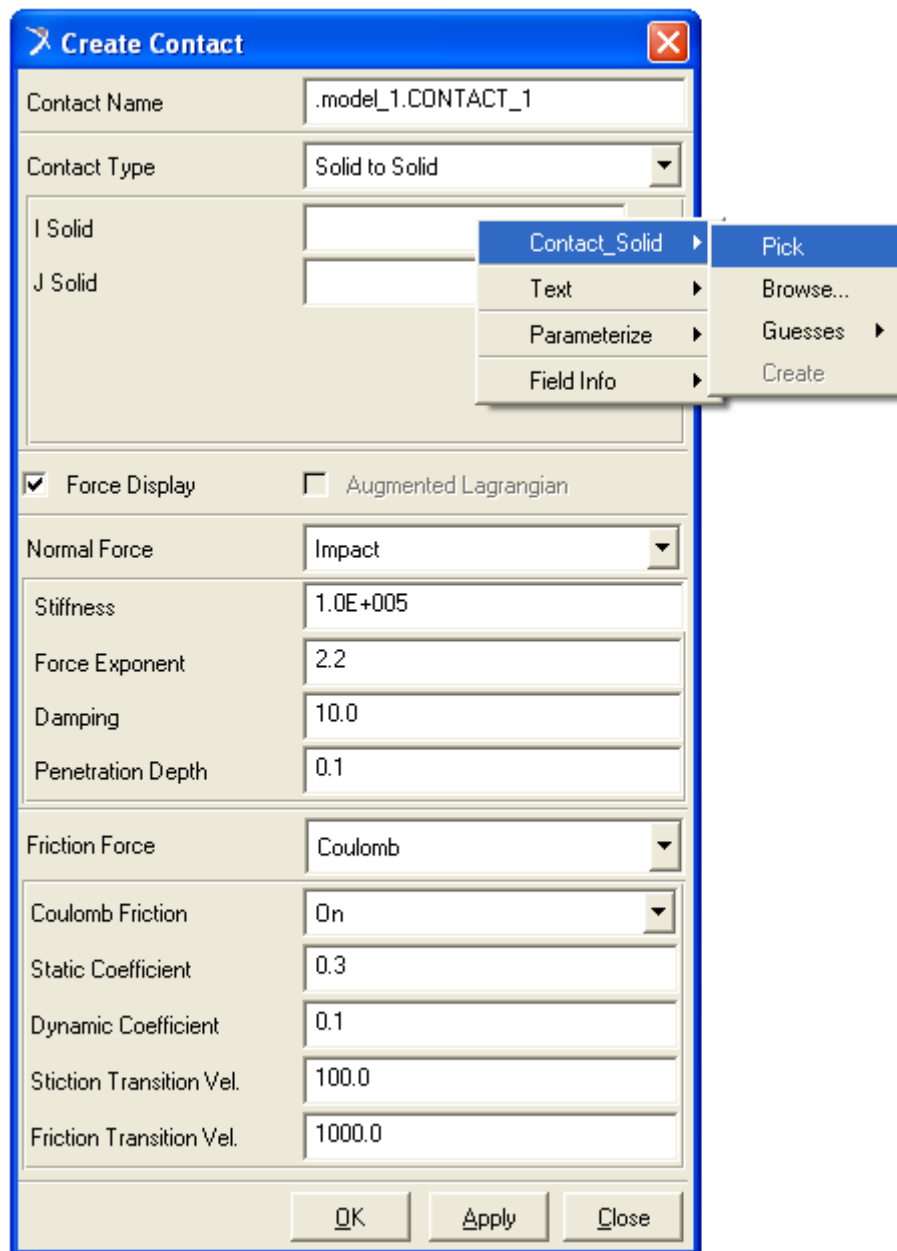



Figura 3.3.5.10 - Menú de Contactos.

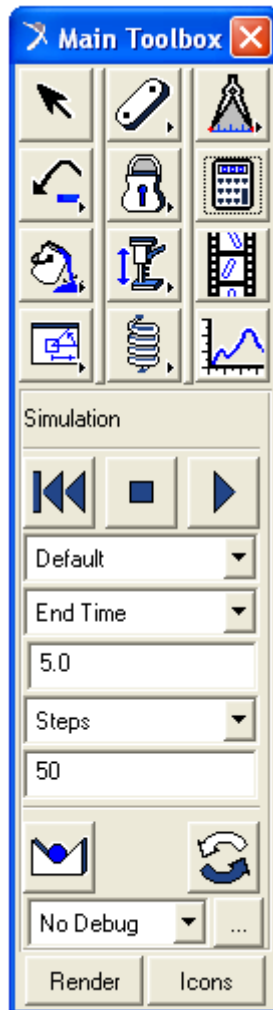
Con el botón derecho, siguiendo la imagen de ejemplo, se seleccionará los sólidos en “I solid” y “J solid” que queremos que tengan contacto.

Además se podrá definir el tipo de contacto y si se desea fuerza de rozamiento.

4. SIMULACIÓN DEL MODELO.

Una vez diseñado el modelo se procede a simularlo. Para ello se utiliza el

siguiente icono,  transformándose la barra de tareas en la que aparece a continuación:



Antes de simular conviene comprobar el equilibrio estático para ver si se ajusta a lo esperado.

El equilibrio se comprueba con



Para simular se define el tiempo (duración) y los pasos de la simulación. Para una simulación corta y relativamente fiable con unos 100 pasos por segundo basta. Si se quiere refinar se introducirán entre 500 y 1000 pasos por segundo.

Durante la simulación se aprecian los posibles errores de diseño, de forma que el mecanismo se comporte de forma inesperada o que surjan errores en la simulación y ésta se detenga. Si esto sucede hay que estudiar los posibles errores, resolverlos y volver a simular de nuevo.

Los iconos que tenemos en la simulación son los siguientes:



Sirve para iniciar la simulación



Sirve para detener la simulación en un momento dado.



Sirve para reiniciar las condiciones iniciales de la simulación. Es imprescindible pulsarlo para volver a simular.



Repite la última simulación realizada.

Figura 3.4.1 -

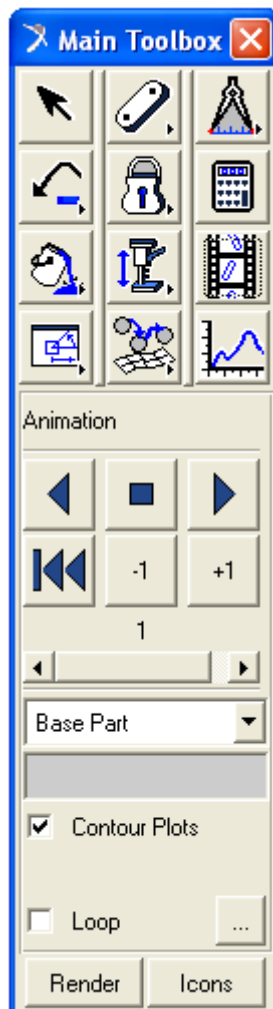
Menú de simulación.

5. ANIMACIÓN DEL MODELO.

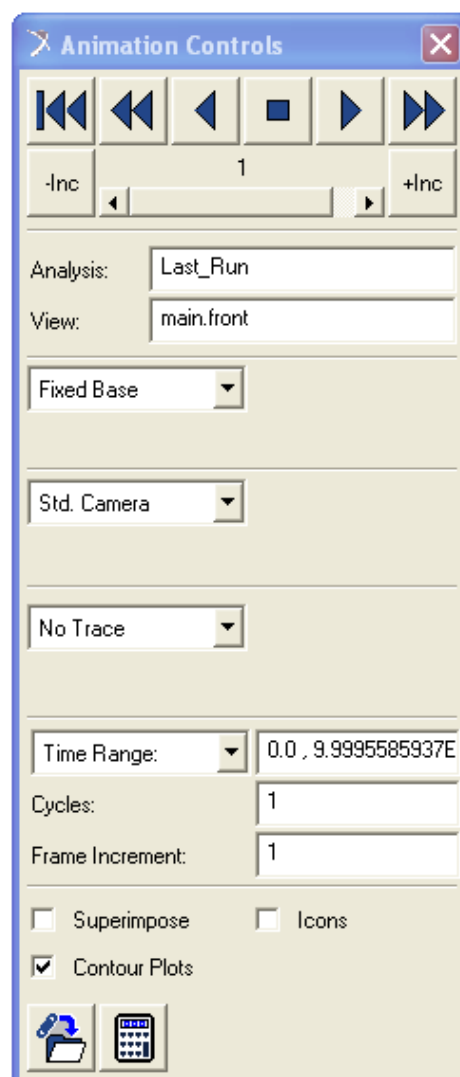
Una vez simulado el modelo se puede visualizar con



Quedando la barra de tareas de la manera siguiente:



Con los iconos que aparecen se puede reproducir la animación, parar, reproducir en sentido inverso y reiniciar. Además, si se marca la pestaña “loop” la animación se reiniciará automática e indefinidamente cuando ésta acabe. Si se quiere dar más opciones se puede pulsar visualizando entonces el siguiente menú:



Aquí se podrá utilizar una cámara móvil que siga uno de los sólidos o markers, generar una traza que describa el movimiento de un marker, variar el rango del tiempo de reproducción o aumentar la velocidad de reproducción usando “frame increment” con un valor entero mayor que uno.

Figura 3.5.1 - Menú de Animación.

6. TOMA DE MEDIDAS.

Para la toma de medidas es imprescindible haber primero simulado.

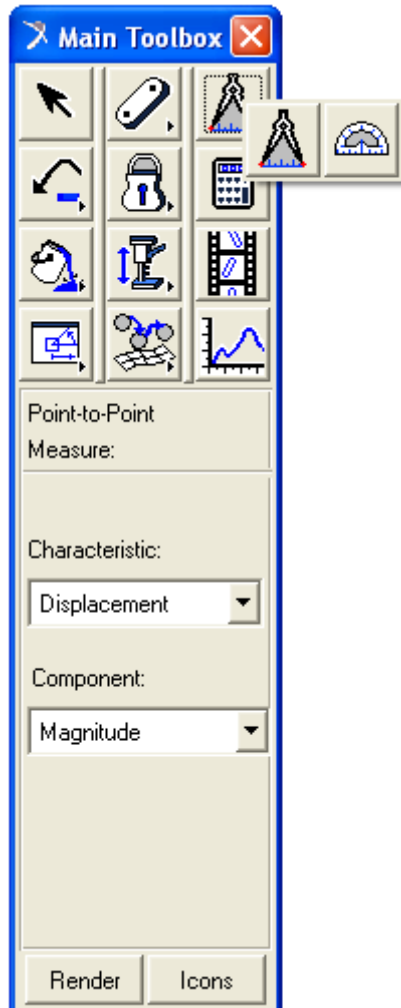
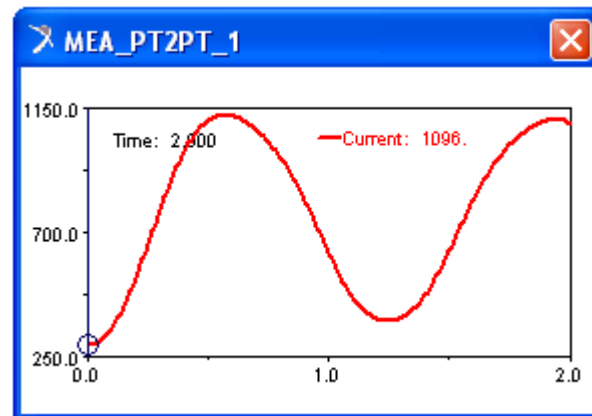


Figura 3.6.1 - Medidas

mediante el cuál se podrá obtener, según el sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico o esférico) multitud de medidas de diferentes parámetros, como desplazamientos, posición respecto a diferentes ejes, velocidades, aceleraciones, fuerzas, pares de giro, etc.

De una manera elemental se pueden medir ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones lineales entre dos sólidos utilizando los iconos que se muestran a la izquierda, apareciendo en el espacio de trabajo un diagrama como el que se muestra a continuación:



otra forma de obtener medidas es utilizar los markers y las juntas para medir directamente sobre ellos. Para ello se seleccionará el marker o la junta, y con el botón derecho se seleccionará "Measure",

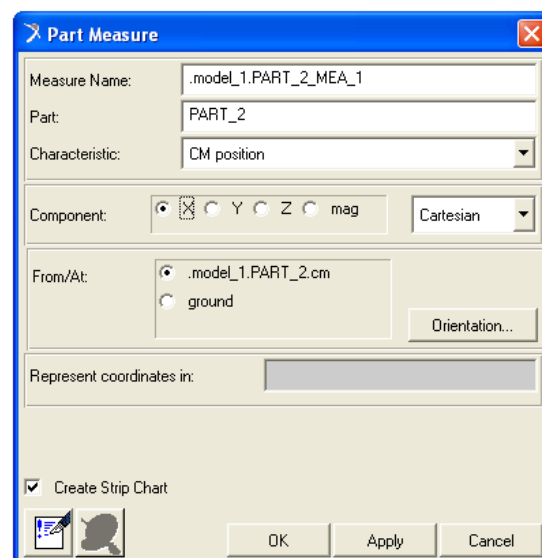



Figura 3.6.2 - Medidas.

7. POSTPROCESADOR.

Para finalizar esta guía y antes de los ejemplos prácticos se explicará brevemente el postprocesador de datos y como exportar los mismos.

El postprocesador es una herramienta de ADAMS:MSC llamada “ADAMS Postprocessor” que permite un estudio detallado de los resultados que se han obtenido mediante las simulaciones. Además permite visualizar también animaciones para su posterior exportación.

Se puede acceder a él mediante el acceso directo o  directamente desde

ADAMS -
PostProcessor

ADAMS View de una manera más cómoda siguiendo los pasos siguientes:

Cuando se toma una medida de cualquier tipo se pulsará sobre ella con el botón derecho y se seleccionará “Transfer To Full Plot” de la siguiente forma:

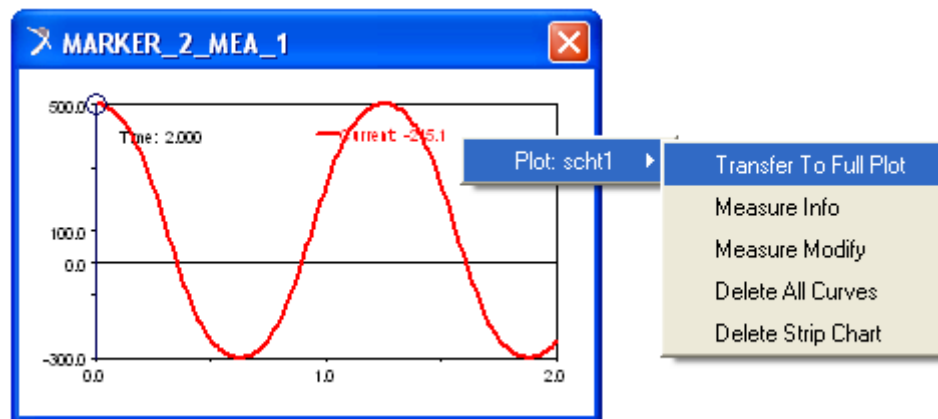



Figura 3.7.1 - Paso de medidas al POSTPROCESADOR.

Una vez hecho se abrirá el postprocesador automáticamente. Todo lo que se guarde de esta forma a partir de ahora quedará guardado en la misma base de datos que estemos utilizando de manera que siempre que esté la base de datos abierta en la que la cual se esté trabajando se podrá acceder directamente al postprocesador pinchando en el siguiente icono de la

barra de tareas:  y de la misma forma se podrá volver a ADAMS View con:



El postprocesador aparece en la siguiente página:

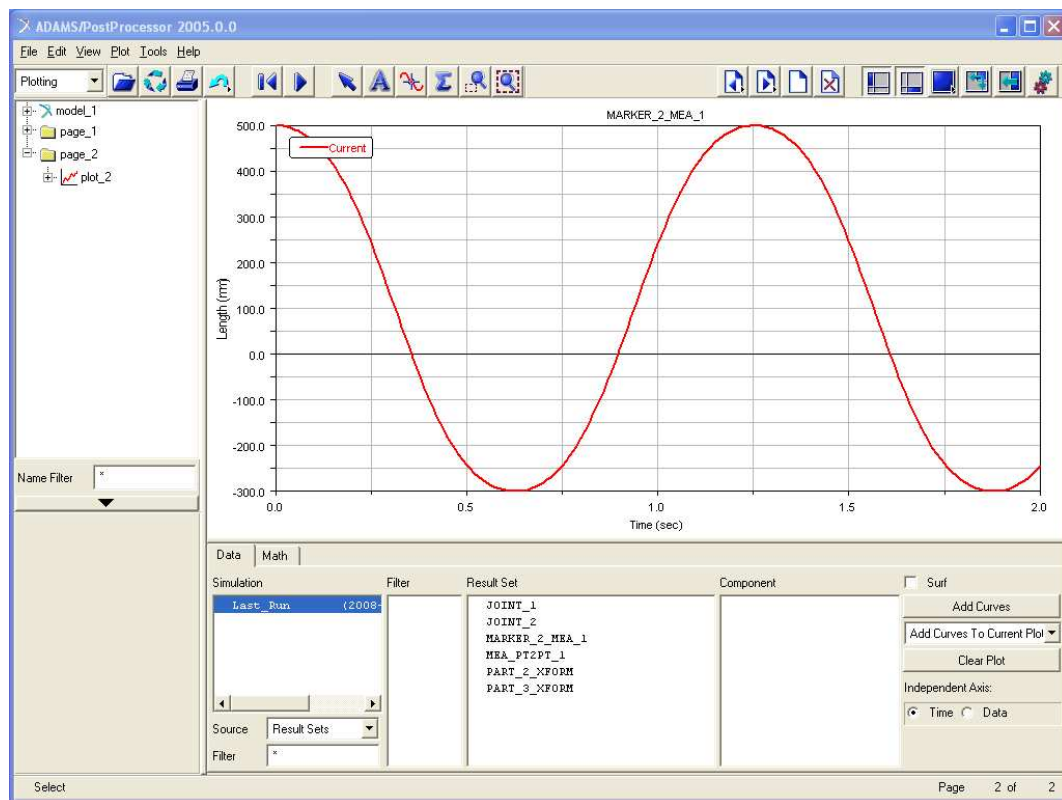


Figura 3.7.2 - Postprocesador.

Para exportar datos se seleccionará en “File” la opción “Export”, “Table”. Entonces aparecerá el siguiente cuadro, donde se definirá el nombre del archivo y la serie de datos que se desea exportar. Para ello, tal y como se muestra, a continuación se pincha directamente sobre el gráfico.

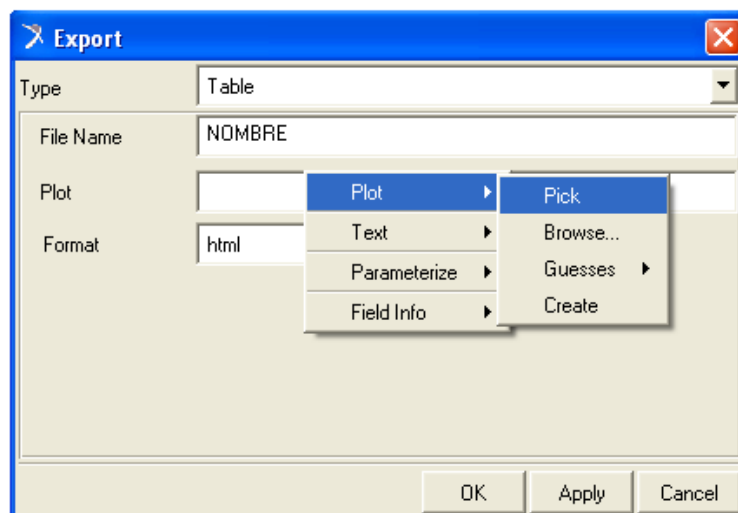


Figura 3.7.3 - Exportación de datos y archivos.

Es importante antes de aceptar, haber elegido una carpeta de destino, que será en principio la que se definió al iniciar el nuevo modelo. Si no se conoce se elegirá en “File”, “Select Directory”.

Para cargar animaciones, se pulsará con el botón derecho en cualquier parte de la gráfica y se seleccionará “Load Animation”, cargándose automáticamente la animación.

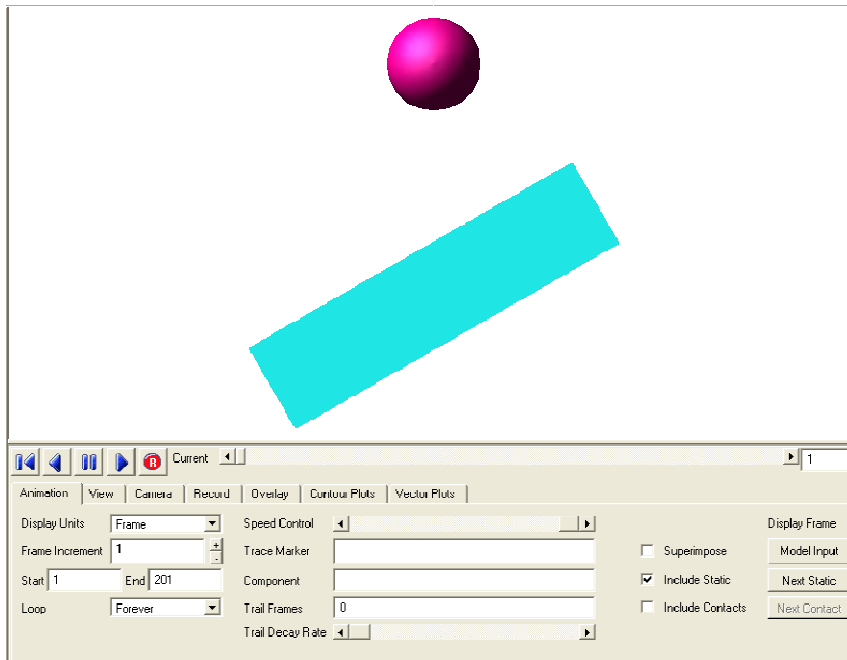


Figura 3.7.4 - Carga y visualización de animaciones en el Postprocesador.

Ahora se podrá reproducir, con el cuadro que se muestra, cambiar la cámara, la vista, la calidad y grabar vídeos para su exportación, lo que se hará de la siguiente forma:

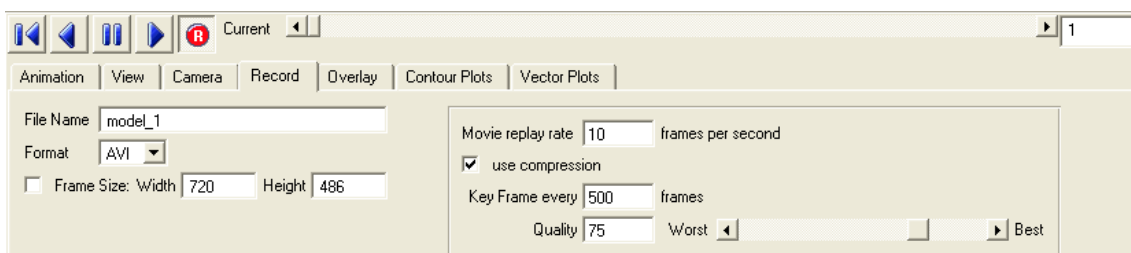




Figura 3.7.5 - Grabación de animaciones.

Primero, en “File Name” se seleccionará el nombre de la animación y se definirá la calidad de la misma.

Se pulsará el icono de grabar y  posteriormente, el play 

El archivo se grabará en la carpeta seleccionada por defecto en formato AVI.

8. EJEMPLOS.

EJEMPLO 1: CREACIÓN DE UN PÉNDULO SIMPLE:

Se iniciará un nuevo modelo, especificando antes la carpeta de destino, y se comprobará también las unidades y la gravedad. Una vez hecho se dará en OK y aparecerá el espacio de trabajo. Se dejará la malla activada y se procederá a diseñar los elementos.

DISEÑO DE LOS SÓLIDOS:

-1º. CREACIÓN DE PUNTOS: Se va a proceder a situar los elementos en el espacio de trabajo. Para ello se elegirá el punto de la barra de tareas y en “Point Table” se crearán dos puntos, uno en $(0, 0, 0)$, y otro en $(200, -200, 0)$, que definirán la longitud del péndulo.

-2º. CREACIÓN DE LOS SÓLIDOS: Se generan los elementos del péndulo, que van a ser dos, un eslabón y una esfera. En la barra de tareas se elegirá el eslabón y se predefinirá sus dimensiones, 2cm de ancho y 2cm de profundidad. Entonces se pinchará en el punto situado en $(0, 0, 0)$ y automáticamente aparecerá un esquema del eslabón. Inmediatamente se pinchará en el segundo punto situado en $(200, -200, 0)$ y el eslabón quedará perfectamente definido. A continuación se elegirá la esfera de la barra de tareas. Se predeterminará su radio en 5cm y pincharemos en el extremo del eslabón, el punto $(200, -200, 0)$. Si todo ha ido bien deberá aparecer lo siguiente en el espacio de trabajo:

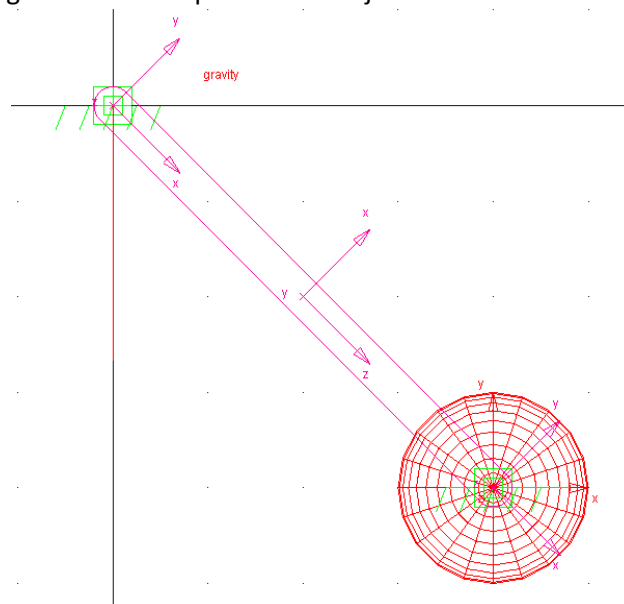


Figura 3.8.1 - Péndulo Simple.

GUARDAR EJEMPLO: Se recomienda guardar con el nombre deseado en la carpeta especificada antes de seguir.

-3º. OPERACIONES BOOLEANAS: Se va a proceder a unir mediante una operación booleana el eslabón y la esfera. Se elegirá la opción “Unite two solid” y se fusionarán pasando a ser uno solo sólido rígido. Como se puede apreciar ahora son del mismo color.

-4º. JUNTAS Y RESTRICCIONES: Se aplicará una junta de revolución en el punto (0, 0, 0) para unir el sólido rígido y el suelo. Para ello se elegirá la junta “Joint: Revolute” de la barra de tareas. Se comprobará que en construcción esté definida la opción “dos cuerpos-una situación” (2 Bod-1 Loc). A continuación se pinchará primero en el sólido y posteriormente en cualquier punto del suelo (o a la inversa) y para finalizar en el Marker del sólido situado en el punto (0, 0, 0). Si se ha realizado correctamente la operación deberá aparecer el icono de la junta en el punto (0, 0, 0), como se muestra a continuación:

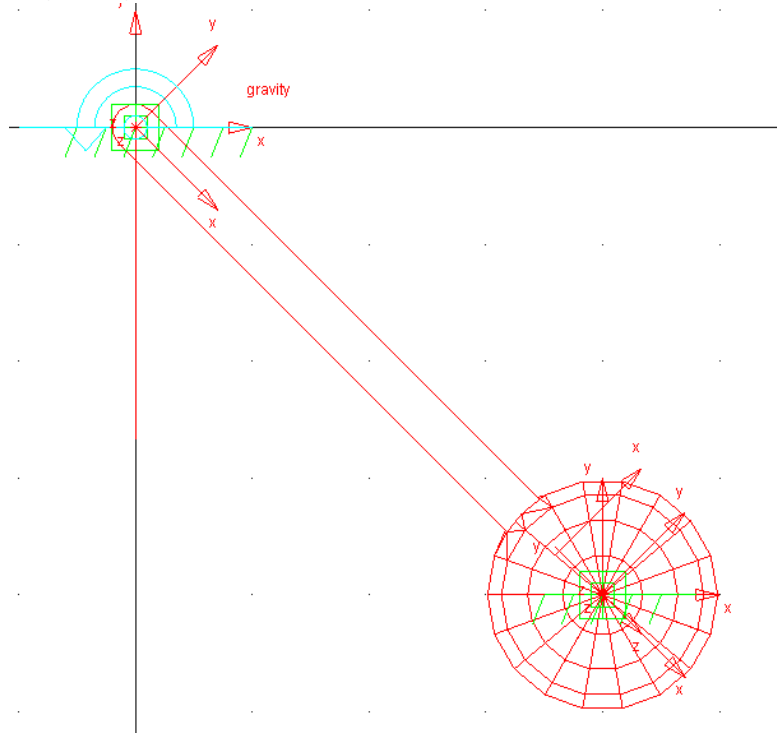


Figura 3.8.2 - Operación Booleana de unir.

GUARDAR EJEMPLO: Se recomienda guardar con el nombre deseado en la carpeta especificada antes de seguir. Si se especifica el mismo nombre el programa preguntará si se quiere guardar una copia de seguridad. Se deja a elección del usuario.

-5º. SIMULACIÓN: A continuación se va a simular el modelo. Para ello se elegirá simular en la barra de tareas, se especificará 3 segundos y 300 pasos. Se dará al play y el modelo deberá a empezar a oscilar. Si durante la simulación ha ocurrido algún tipo de error se deberá revisar el diseño siguiendo los pasos anteriores. Una vez que se compruebe que el modelo es correcto se realizará la toma de medidas y visualizar la animación.

-6º. TOMA DE MEDIDAS: En el modelo se van a tomar tres medidas: la velocidad angular del eje de giro, la aceleración angular del eje de giro y la posición respecto al eje Y del centro de la esfera:

- Velocidad: Se pinchará con el botón derecho sobre la zona del eje de giro. A continuación dentro del menú se elegirá el marker correspondiente al inicio del eslabón. Si no se está seguro, antes de dar a “Measure” se seleccionará “Select” para resaltarlo y asegurarse:

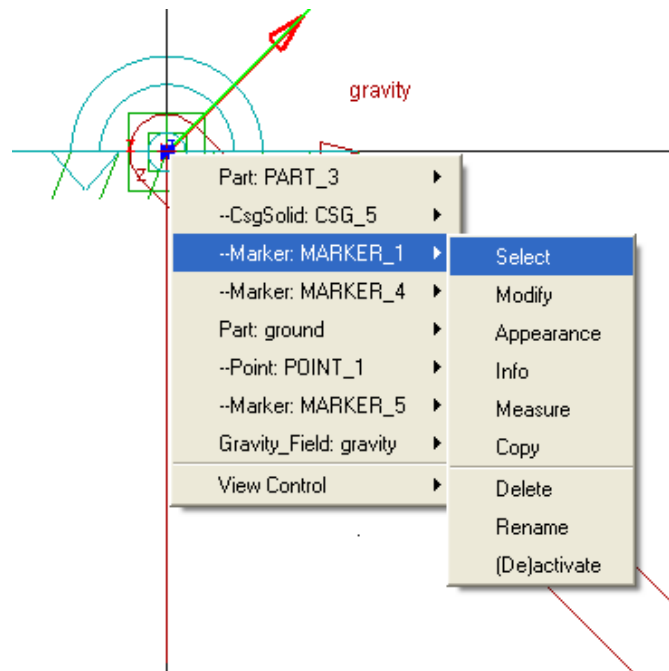


Figura 3.8.3 - Selección de MARKER para toma de medidas.

Una vez seleccionado “Measure” del marker correcto aparecerá el siguiente cuadro de diálogo. En él se definirá el nombre(opcional), el tipo de medida y la componente sobre la cual se va a realizar la medida, en este caso el eje Z.

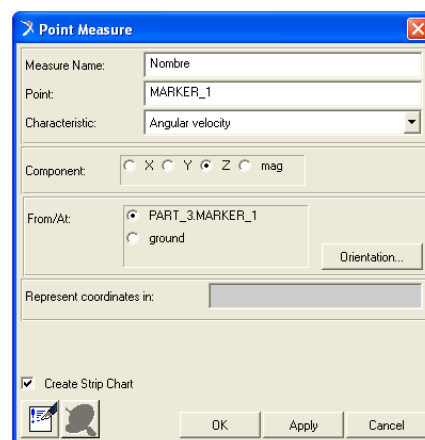


Figura 3.8.4 - Toma de medida.

- Aceleración angular del eje de giro: Se seguirán los mismos pasos que en el ejemplo anterior, con la única diferencia que se medirá la aceleración angular.
- Posición respecto al eje Y del centro de la esfera: Se seguirán los mismos pasos que en los ejemplos anteriores, pero la medida se tomará en el marker del centro de la esfera, y se medirá la posición (Translational Displacement) respecto al eje Y.

Las medidas deberían quedar como las siguientes:

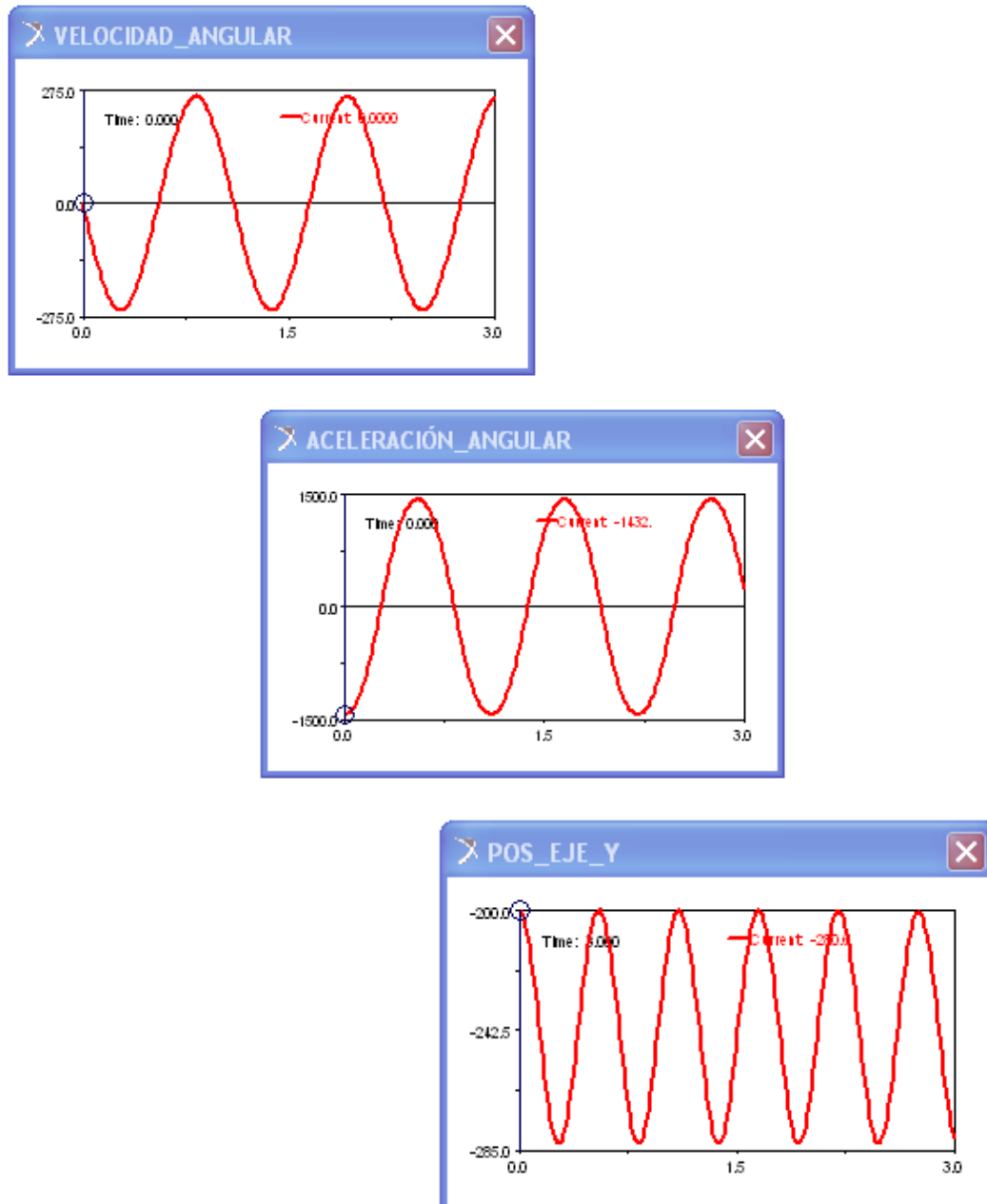


Figura 3.8.5 - Medidas.



-7º. VISUALIZACIÓN DE LA ANIMACIÓN: Se recomienda visualizar la animación desde varias vistas, utilizar las herramientas para desplazarse por el espacio de trabajo, utilizar el renderizado, cambiar el color, etc., para habituarse a las herramientas del sistema.

GUARDAR EJEMPLO.

Con este punto se da por concluido el ejemplo 1 de la guía.

EJEMPLO 2: CREACIÓN DE UN PENDULO DOBLE CON UN MOTOR ROTATIVO.

Se iniciará un nuevo modelo, especificando antes la carpeta de destino, y se comprobará también las unidades y la gravedad. Una vez hecho se dará en OK y aparecerá el espacio de trabajo. Se dejará la malla activada y se procederá a diseñar los elementos.

-1º. CREACIÓN DE PUNTOS: Se crearán tres puntos con “Point Table”, en $(0, 0, 0)$, $(150, -200, 0)$ y en $(400, -300, 0)$.

-2º. CREACIÓN DE LOS SÓLIDOS: Se generan los elementos del péndulo, que van a ser dos eslabones y una esfera. Los eslabones tendrán de dimensiones definidas el ancho (2cm) y la profundidad (2cm). La esfera será de 5cm de radio. El primer eslabón irá de $(0, 0, 0)$ a $(150, -200, 0)$, y el segundo de $(150, -200, 0)$ a $(400, -300, 0)$. La esfera irá situada en $(400, -300, 0)$.

-3º. JUNTAS Y RESTRICCIONES: A diferencia del ejemplo 1, la esfera irá unida al eslabón mediante una junta fija en $(400, -300, 0)$ en lugar de una operación booleana. Se unirán los eslabones entre sí mediante una junta de rotación en $(150, -200, 0)$, y el primer eslabón al suelo mediante otra junta de rotación. Se recomienda utilizar los markers en vez de los puntos para situar las juntas, debido a que así solo irán vinculadas a los sólidos. Se comprobará antes de seguir que las juntas están perfectamente orientadas y situadas.

Si todo ha ido correctamente, el ejemplo debe ser similar al siguiente:

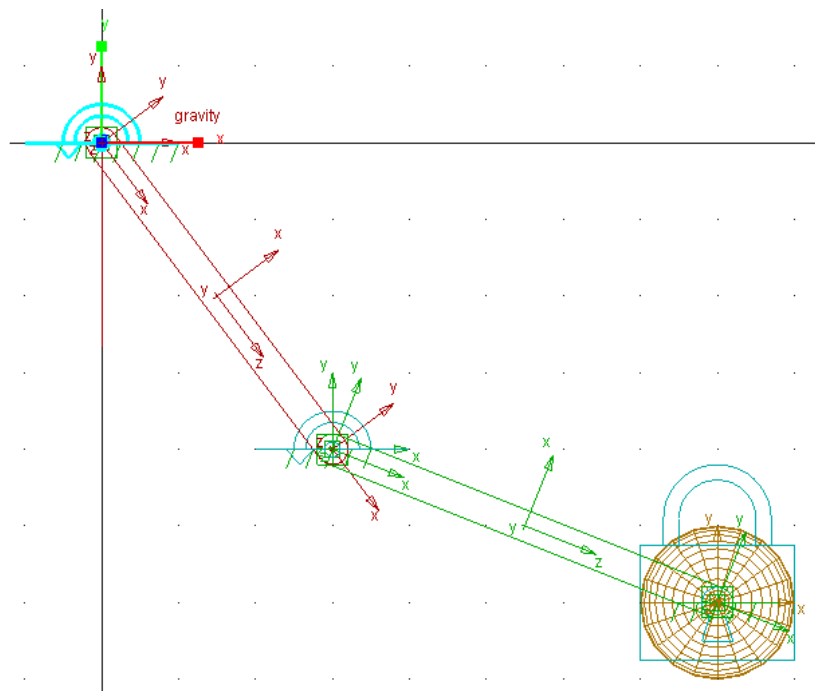


Figura 3.8.6 - Diseño del péndulo doble.

GUARDAR EJEMPLO

-4º. MOTOR: Se situará un motor rotativo en la junta rotativa situada en $(0, 0, 0)$. Una vez situada se modificará su velocidad a $60^\circ/\text{s}$. La función debe ser: $60.0d \cdot \text{time}$. Siempre para que una modificación surja efecto se debe pulsar en Ok o en Apply.

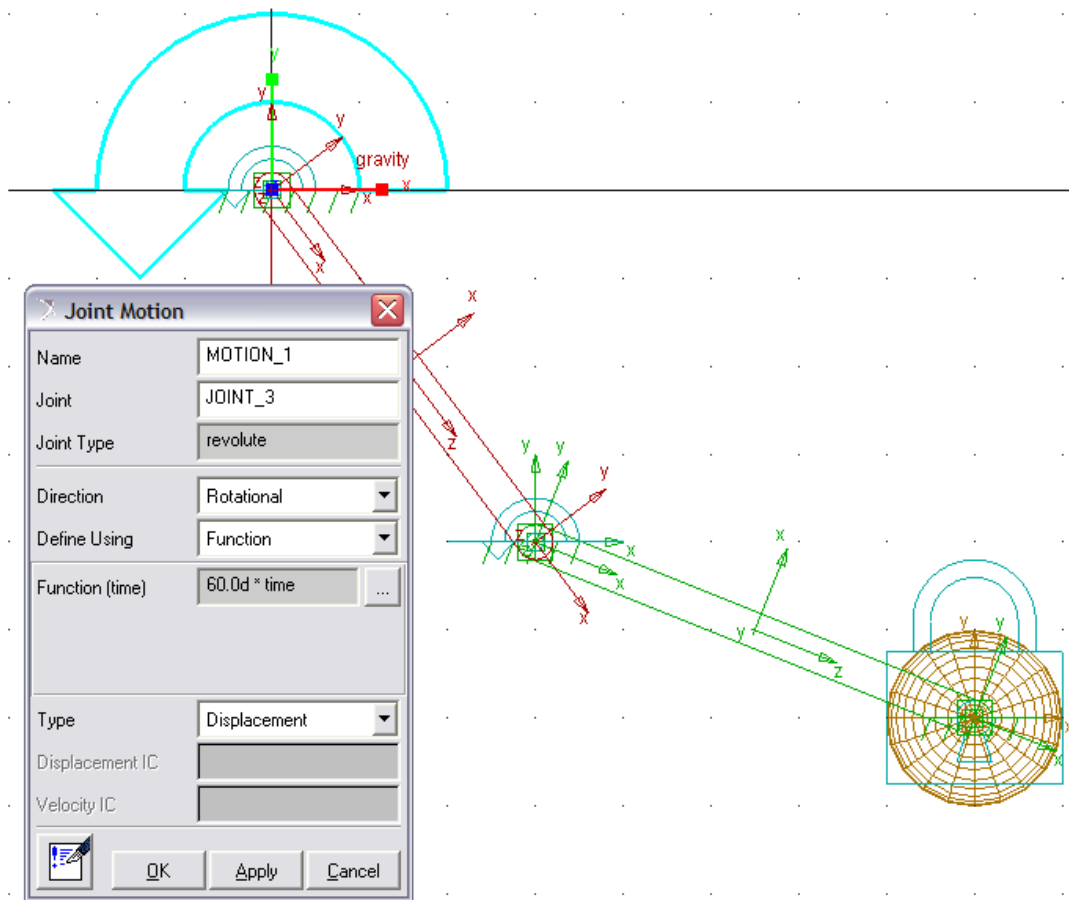


Figura 3.8.7 - Implementación del Motor.

GUARDAR EJEMPLO.

-5º. SIMULACION: Se simulará 6 segundos con 600 pasos. Si ocurre algún error se revisarán los puntos anteriores.

GUARDAR ELEMPLLO.

-6º. TOMA DE MEDIDAS: Como se vio en el ejemplo 1, se tomarán medidas de la velocidad angular de las dos juntas rotativas, y de la posición X e Y en coordenadas cartesianas del centro de la esfera.

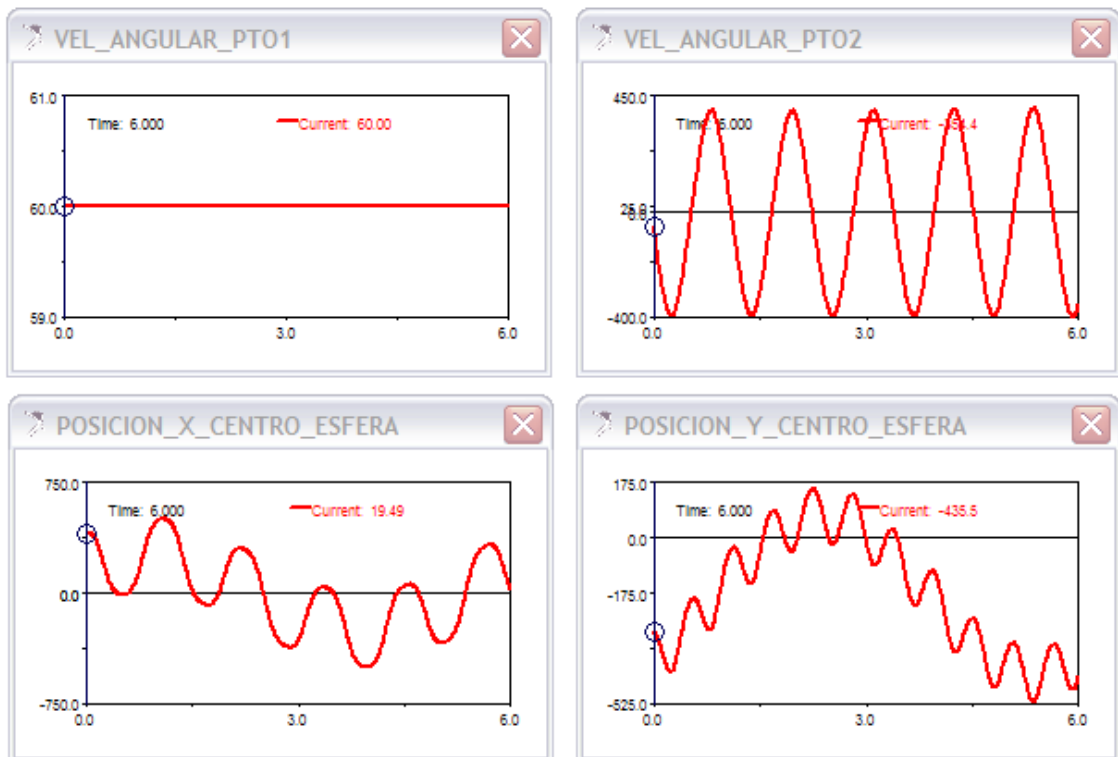


Figura 3.8.8 - Toma de medidas.

GUARDAR EJEMPLO.

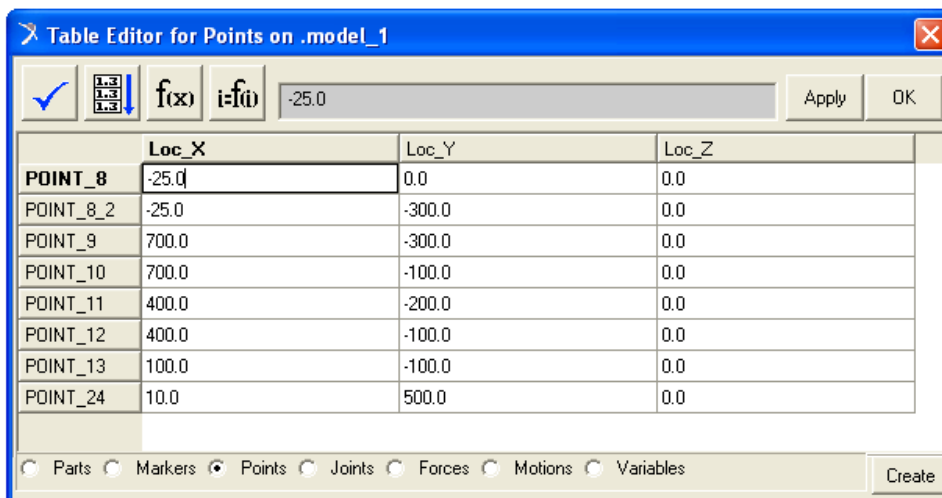
El ejemplo 2 ha sido concluido.

EJEMPLO 3: CONTACTO ENTRE SÓLIDOS.

En este ejemplo se aprenderá a dar contacto entre los sólidos, aunque también se diseñará en 2-D.

Se iniciará un nuevo modelo, especificando antes la carpeta de destino, y se comprobará también las unidades y la gravedad. Una vez hecho se dará en OK y aparecerá el espacio de trabajo. Se dejará la malla activada y se procederá a diseñar los elementos.

1º. CREACIÓN DE PUNTOS: se creará una “Point Table” como la que se muestra a continuación:



	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
POINT_8	-25.0	0.0	0.0
POINT_8_2	-25.0	-300.0	0.0
POINT_9	700.0	-300.0	0.0
POINT_10	700.0	-100.0	0.0
POINT_11	400.0	-200.0	0.0
POINT_12	400.0	-100.0	0.0
POINT_13	100.0	-100.0	0.0
POINT_24	10.0	500.0	0.0

Figura 3.8.9 - “Point Table”

Si la numeración de los puntos no coincide no supone problema ninguno, pero es importante que las coordenadas sean las adecuadas.-2º. CREACIÓN DE LOS SÓLIDOS: Para este ejemplo se va a crear una esfera, una extrusión y una cadena de eslabones con una esfera en su extremo.

Esfera: se creará una esfera de 2cm de radio y se situará en el punto (10, 500, 0)

Cadena: debido a la simplicidad del diseño de la cadena ésta se modelará sin la ayuda de puntos. Primero se definirán sus dimensiones, que serán 10cm de largo, 2cm de ancho y 2cm de profundidad. El primero se colocará en el origen siguiendo el eje X en sentido positivo. Se colocarán cinco eslabones más a continuación unos de otros siguiendo también el eje X. En el extremo del último eslabón se colocará una esfera de 5cm de radio, como en los ejemplos de los péndulos. La cadena debería quedar de la siguiente manera:

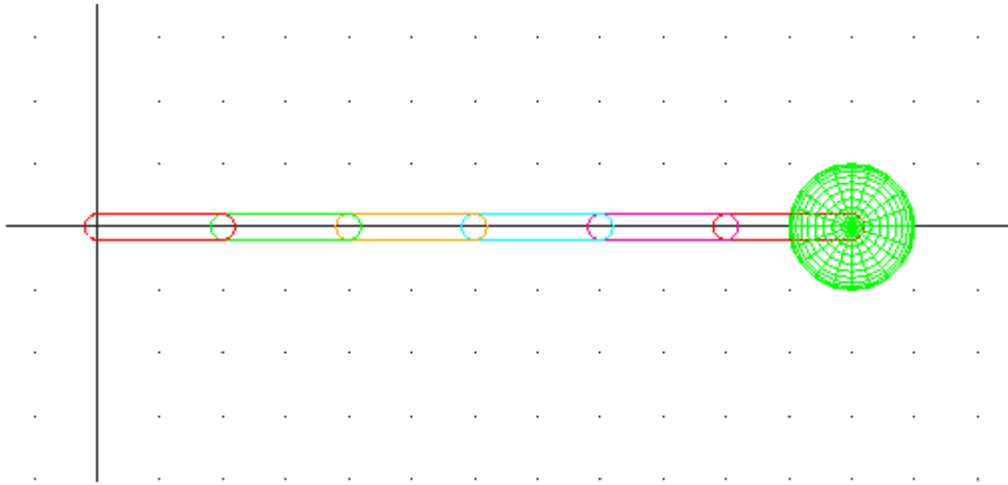


Figura 3.8.10 - Implementación de los eslabones y la esfera.

Extrusión: Para la extrusión se utilizarán los puntos. Primero se definirá su longitud, que será de 15cm, y en “Path” se definirá “About Center” para que se extruya simétricamente, de manera que el modelo completo quede de la siguiente forma:

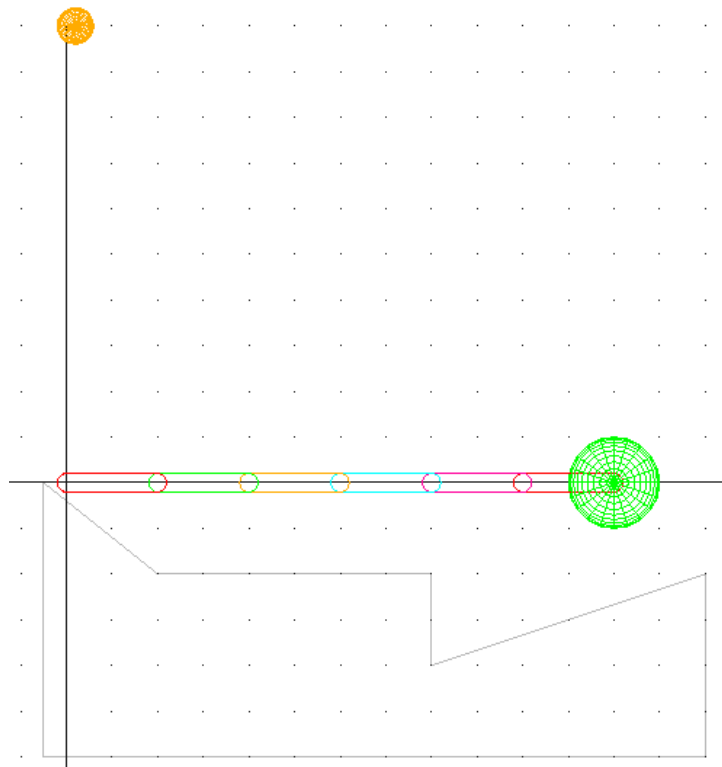


Figura 3.8.11 – Extrusión.

GUARDAR EJEMPLO.

-3º. JUNTAS Y RESTRICCIONES: Se utilizarán juntas de rotación entre el suelo y el primer eslabón de la cadena y entre los siguientes. Entre la esfera de la cadena y el último eslabón se utilizará una junta fija, como en el ejemplo 2. Se utilizará otra junta fija entre la extrusión y el suelo, y se colocará en cualquier punto de la extrusión. La esfera del punto (10, 500, 0) quedará libre de juntas, y por lo tanto sufrirá una caída libre.

GUARDAR EJEMPLO.

-4º. CONTACTO: Ahora llega la operación más delicada y laboriosa del modelado. Primero se abrirá el cuadro de diálogo de contacto (consultar la guía si no se encuentra). Dentro de él se aplicará rozamiento de Coulomb dejando los parámetros por defecto, y se procederá a dar contacto entre los elementos. Es importante realizar los contactos uno a uno. Primero se aplicará contacto entre la esfera libre y cada uno de los seis eslabones de la cadena, la esfera del final de la cadena y la extrusión. A continuación se dará contacto entre la extrusión y cada

uno de los seis eslabones de la cadena y la esfera del final de la cadena (el contacto con la esfera libre ya ha sido definido).

GUARDAR EJEMPLO.

Si todo ha sido definido correctamente el modelo debe ser similar al que se muestra en la página siguiente:

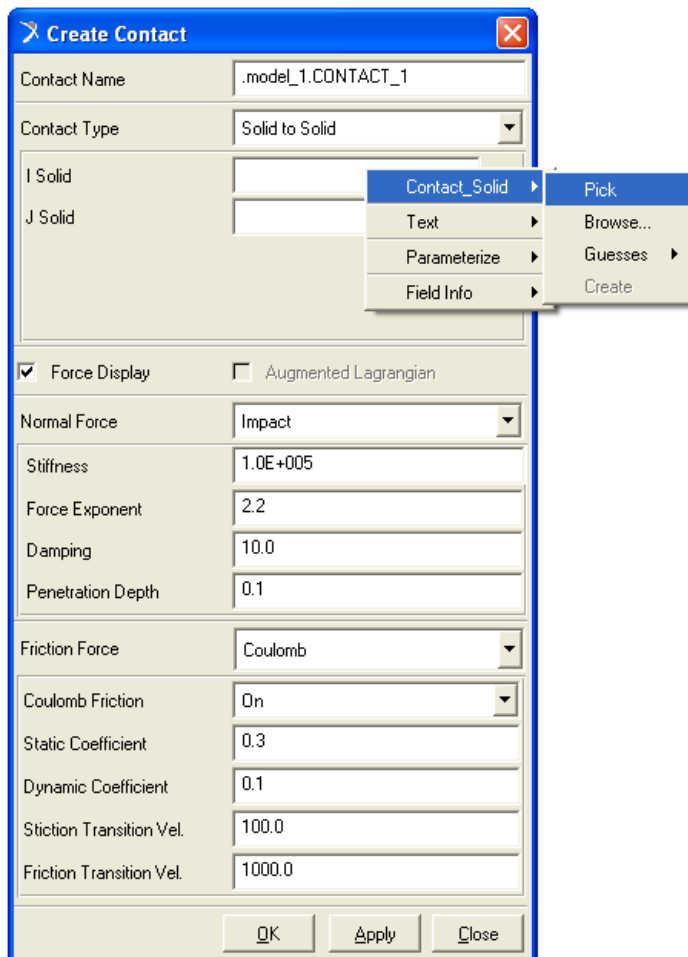


Figura 3.8.12 – Contacto entre sólidos.

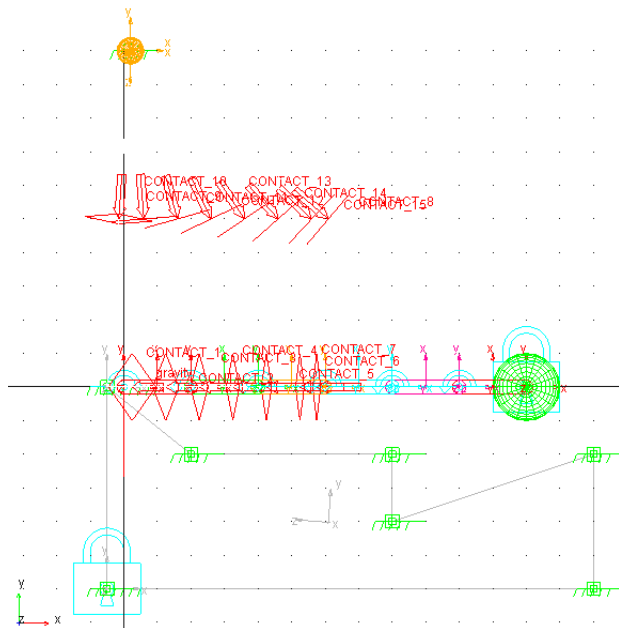


Figura 3.8.13 - Implementación de contactos.

y el modelo en isométrico renderizado:

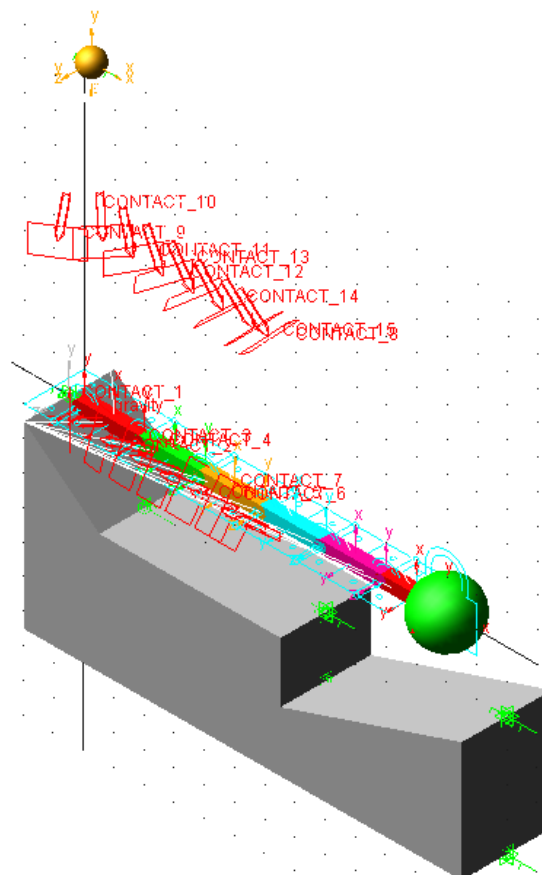


Figura 3.8.14 - Vista Isométrica del Modelo.

-5º.SIMULACIÓN: Se procede a simular el modelo con un tiempo de 8 segundos y 2400 pasos, 300 por paso. En una simulación por contacto conviene utilizar más pasos por segundo, de ahí que se usen 300 en vez de 100. La simulación será mucho más lenta que en los ejemplos anteriores, pero en principio debería funcionar. El modelo debería comportarse de forma que la cadena se ajustara a la forma de la extrusión de una forma lenta mientras la esfera libre debe caer para rodar posteriormente por la cadena. Cabe la posibilidad de que la esfera caiga de la cadena y por último de la extrusión.

-6º.ANIMACIÓN: Se recomienda ver la animación desde diferentes posiciones, así como utilizar el renderizado.